

e- ISSN:2458-7575

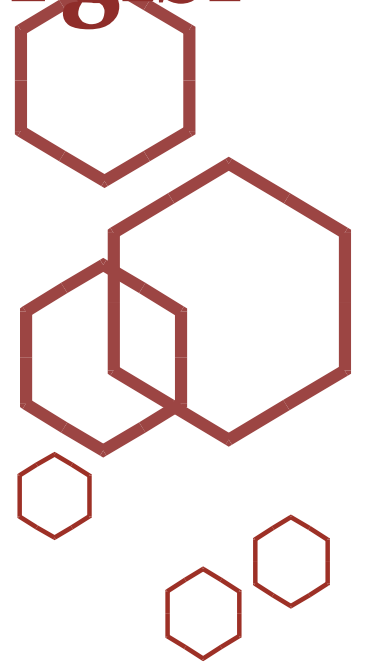
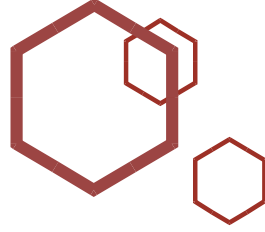


Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

Bilecik Şeyh Edebali University

Journal of Science



edergi@bilecik.edu.tr

Sahibi / Publisher

Prof. Dr. Şükrü BEYDEMİR (Rektör / Rector)

Editör / Editor

Doç. Dr. Birol AKYÜZ (Enstitü Müdürü / Institute Director)

Yardımcı Editör / Associate Editor

Dr. Öğr. Üyesi Gözde KOCA

İngilizce Dil Editörü / English Language Editor

Öğr. Gör. Dr. Ayça BAKINER ÇEKİN

Yazı İşleri Müdürü / Editorial Office Director

Mustafa BEKTAŞ

Redaksiyon / Proofreading

Arş. Gör. Damla KILIÇ

Editör Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Çağlayan AÇIKGÖZ (caglayan.acikgoz@bilecik.edu.tr)
Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Hanife MUT (hanife.mut@bilecik.edu.tr)
Tarla Bitkileri Bölümü, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Harun MİNDİVAN (harun.mindivan@bilecik.edu.tr)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KURBAN (mehmet.kurban@bilecik.edu.tr)
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Nurcan ÇALIŞ AÇIKBAŞ (nurcan.acikbas@bilecik.edu.tr)
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Nurgül ÖZBAY (nurgul.ozbay@bilecik.edu.tr)
Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz ARSLAN (oguz.arslan@bilecik.edu.tr)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuzhan ÇAĞLAYAN (oguzhan.caglayan@bilecik.edu.tr)
Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Süheyla YEREL KANDEMİR (suheyla.yerel@bilecik.edu.tr)
Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur YÜZGEÇ (ugur.yuzgec@bilecik.edu.tr)
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Alev AKPINAR BORAZAN (alev.akpinar@bilecik.edu.tr)
Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Arslan ÜNAL (arslan.unal@bilecik.edu.tr)
Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk KARAKURT (cenk.karakurt@bilecik.edu.tr)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Nazile URAL (nazile.ural@bilecik.edu.tr)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Editör Kurulu / Editorial Board

Doç. Dr. Onur EROĞLU (onur.eroglu@bilecik.edu.tr)
Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Önder Gökmen YILDIZ (ogokmen.yildiz@bilecik.edu.tr)
Matematik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Osman Zeki OKUYUCU (osman.okuyucu@bilecik.edu.tr)
Geometri Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Tolga YÜKSEL (tolga.yuksel@bilecik.edu.tr)
Elektrik Elektronik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi. Emrah DOKUR (emrah.dokur@bilecik.edu.tr)
Elektrik Elektronik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Emre DANDIL (emre.dandil@bilecik.edu.tr)
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gözde KOCA (gozde.koca@bilecik.edu.tr)
İşletme Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hülya SİLAH (hulya.mercan@bilecik.edu.tr)
Kimya Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Merve ŞENTÜRK ACAR (merve.senturkacar@bilecik.edu.tr)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan DEMİR (oguzhan.demir@bilecik.edu.tr)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Öner Rafig GURBANOV (rafig.gurbanov@bilecik.edu.tr)
Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sinem ÖZTÜRK ERDEM (sinem.erdem@bilecik.edu.tr)
Bahçe Bitkileri Bölümü, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi



Sahibi / Publisher

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi adına Rektör Prof. Dr. Şükrü BEYDEMİR
Prof. Dr. Şükrü BEYDEMİR (Rector) on behalf of Bilecik Seyh Edebali University

EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Doç. Dr. / Assoc Prof. Dr. Birol AKYÜZ

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 11210 Bilecik, Türkiye
Bilecik Seyh Edebali University, Graduate Education Institute, 11210 Bilecik, Turkey

Telefon/Phone: +90228 2141130 **Faks /Fax:** +90228 2141132

E-posta/E-mail: birol.akyuz@bilecik.edu.tr

Yazı İşleri Müdürü / Editorial Office Director

Mustafa BEKTAŞ

İletişim Bilgileri / Contact Informations

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 11210 Bilecik, Türkiye
Bilecik Seyh Edebali University, Graduate Education Institute, 11210 Bilecik, Turkey

Hakemli bir dergi olan Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi yılda iki kez yayımlanır ve yayımlanan tüm eserlerin yayın hakkı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'ne aittir.

A refereed journal "Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science" is published twice a year and Bilecik Seyh Edebali University holds the copyright of all published material that appear in this journal.

Dergimiz, ULAKBİM Tr Dizin ve Eurasian Scientific Journal Index tarafından taranmaktadır.

Our journal is indexed by ULAKBİM Tr Dizin and Eurasian Scientific Journal Index.

Hakem Listesi / Reviewer Board

Prof. Dr. Ahmet Celal Apay / Düzce Üniversitesi / Sanat, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi / Mimarlık Bölümü / Mimarlık Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ali İhsan Göker / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Fizik Bölümü / Katıhal Fiziği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Can Balkaya / İstanbul Aydın Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Pr.

Prof. Dr. Dilek Ünal / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü / Genel Biyoloji Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ercan Çelik / Atatürk Üniversitesi / Fen Fakültesi / Matematik Bölümü / Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ersen Turaç / Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Kimya Bölümü / Fizikokimya Anabilim Dalı

Prof. Dr. Fatih Altun / Erciyes Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı

Prof. Dr. Fatma Fatoş Germirli Babuna / İstanbul Teknik Üniversitesi / İnşaat Fakültesi / Çevre Mühendisliği Bölümü / Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ferhat Bülbül / Erzurum Teknik Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Prof. Dr. Genççağ Pürçek / Karadeniz Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Malzeme Anabilim Dalı

Prof. Dr. Gülgün Yılmaz / Eskişehir Teknik Üniversitesi / Porsuk Meslek Yüksekokulu / İnşaat Bölümü / Yapı Denetimi Pr.

Prof. Dr. Hasan Erdem Çamurlu / Akdeniz Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Prof. Dr. Hüseyin Çelik / Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bahçe Bitkileri Bölümü / Bağ Yetiştirme ve Islahı Anabilim Dalı

Prof. Dr. Hüseyin Topal / Gazi Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Kadir Kocatepe / Gazi Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Naim Sağlam / Fırat Üniversitesi / Su Ürünleri Fakültesi / Su Ürünleri Yetiştiriciliği Bölümü / Hastalıklar Anabilim Dalı

Prof. Dr. Nevzat Şahin / Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü / Moleküler Biyoloji ve Genetik Anabilim Dalı

Prof. Dr. Nuran Özçiçek Pekmez / Hacettepe Üniversitesi / Fen Fakültesi / Kimya Bölümü / Analitik Kimya Anabilim Dalı

Prof. Dr. Nursel Acar Selçuki / Ege Üniversitesi / Fen Fakültesi / Kimya Bölümü / Fizikokimya Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ramazan Serezli / İzmir Katip Çelebi Üniversitesi / Su Ürünleri Fakültesi / Su Ürünleri Yetiştiriciliği Bölümü / Yetiştiricilik Anabilim Dalı

Prof. Dr. Recep Bakış / Eskişehir Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Hidrolik Anabilim Dalı

Prof. Dr. Rüstem Cangi / Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bahçe Bitkileri Bölümü / Bağ Yetiştirme ve Islahı Anabilim Dalı

Prof. Dr. Serhat Özkeleş / Üsküdar Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Mühendisliği Pr.

Prof. Dr. Süleyman Can Kurnaz / Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Malzeme Bilimi Anabilim Dalı

Prof. Dr. Uğur Köklü / Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Prof. Dr. Yusuf Ziya Umul / Çankaya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü / Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Pr.

Hakem Listesi / Reviewer Board

Doç. Dr. Adem Yağcı / Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bahçe Bitkileri Bölümü / Bağ Yetiştirme ve Islahı Anabilim Dalı

Doç. Dr. Ahmet Fevzi Savaş / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Meslek Yüksekokulu / Elektrik ve Enerji Bölümü / Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Pr.

Doç. Dr. Aksem Aksoy / Kafkas Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Gıda Mühendisliği Bölümü / Gıda Teknolojisi Anabilim Dalı

Doç. Dr. Alev Akpınar Borazan / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Kimya Mühendisliği Bölümü / Temel İşlemler ve Termodinamik Anabilim Dalı

Doç. Dr. Alper Uysal / Yıldız Teknik Üniversitesi / Makine Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı

Doç. Dr. Arslan Ünal / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Fizik Bölümü / Atom ve Molekül Fiziki Anabilim Dalı

Doç. Dr. Ayşe Dinçer / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Kimya Bölümü / Biyokimya Anabilim Dalı

Doç. Dr. Bahadır Karasulu / Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Yazılımı Anabilim Dalı

Doç. Dr. Barış Sayın / İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı

Doç. Dr. Bilge Eren / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Meslek Yüksekokulu / Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü / Otomotiv Teknolojisi Pr.

Doç. Dr. Emine Sema Çetin / Yozgat Bozok Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bahçe Bitkileri Bölümü /Bahçe Bitkileri Yetiştirme ve Islahı Anabilim Dalı

Doç. Dr. Emine Tanış / Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektronik Anabilim Dalı

Doç. Dr. Emre Erdem / Sabancı Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Malzeme Bilimi ve Nano Mühendislik Bölümü / Malzeme Bilimi ve Nano Mühendislik Pr.

Doç. Dr. Emre Özşahin / Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Coğrafya Bölümü / Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

Doç. Dr. Fehmi Nair / Erciyes Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Doç. Dr. Fevzi Önen / Dicle Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Hidrolik Anabilim Dalı

Doç. Dr. Fuat Kara / Düzce Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Doç. Dr. Fuat Usta / Düzce Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı

Doç. Dr. Halit Öztekin / Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Hasan Öktem / Kocaeli Üniversitesi / Hereke Asım Kocabıyık Meslek Yüksekokulu / Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü / Makine Pr.

Doç. Dr. Hasan Özkaynak / Beykent Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Pr.

Doç. Dr. Hatice Bilir Ekbiç / Ordu Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bahçe Bitkileri Bölümü / Bağ Yetiştirme ve Islahı Anabilim Dalı

Doç. Dr. Hüseyin Gürüler / Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı

Doç. Dr. İbrahim Çelikyürek / Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Malzeme Anabilim Dalı

Doç. Dr. İlker İnam / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Analiz ve Fonksiyonlar Teorisi Anabilim Dalı

Hakem Listesi / Reviewer Board

- Doç. Dr. Kemal Saplıoğlu / Süleyman Demirel Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Hidrolik Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Levent Uğur / Amasya Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Mekanik Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Mahmut Modanlı / Harran Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Mehmet Canbaz / Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Mustafa Kurban / Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektro Magnetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Okan Fıstıkoğlu / Dokuz Eylül Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Hidrolik Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Oya Ünsal Tan / Hacettepe Üniversitesi / Eczacılık Fakültesi / Eczacılık Meslek Bilimleri Bölümü / Farmasötik Kimya Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Resul Çötel / Fırat Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü / Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Sadık Alper Yıldız / Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Malzemesi Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Sedat Bingöl / Dicle Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Sedat Sert / Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Selçuk Özcan / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Üretim ve Servis Sistemleri Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Serdar Karakurt / Selçuk Üniversitesi / Fen Fakültesi / Biyokimya Bölümü / Biyokimya Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Sezgin Kaçar / Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Şenol Gürsoy / Karabük Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Veli Şimşek / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Kimya Mühendisliği Bölümü / Kimyasal Teknolojiler Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Yunus Kaya / Bursa Teknik Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Kimya Bölümü / Fizikokimya Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Yunus Türen / Karabük Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Üretim Metalurjisi Anabilim Dalı
- Doç. Dr. Zafer Şiar / Bingöl Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Cebir ve Sayılar Teorisi Anabilim Dalı
- Dr. Öğr. Üyesi Abtullah Tuğcu / Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Tavşanlı Meslek Yüksekokulu / Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü / Makine Pr.
- Dr. Öğr. Üyesi Adnan Sağlam / Bartın Üniversitesi / Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektro Manyetik Alanlar ve Mikrodalga Teknolojisi Anabilim Dalı
- Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif Boğa / Afyon Kocatepe Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı
- Dr. Öğr. Üyesi Alper Cumhuri / Yalova Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Dr. Öğr. Üyesi Alper Yargıç / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Yazılım Mühendisliği Bölümü / Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı
- Dr. Öğr. Üyesi Aylin Özodabaş / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı

Hakem Listesi / Reviewer Board

Dr. Öğr. Üyesi Bilal Ervural / Necmettin Erbakan Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Bora Şener / Yıldız Teknik Üniversitesi / Makine Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Cihan Şahin / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi / Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu / Elektrik ve Enerji Bölümü / Elektrik Pr.

Dr. Öğr. Üyesi Çağlar Karamaşa / Anadolu Üniversitesi / İşletme Fakültesi / İşletme Bölümü / İşletme Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Derya Öven Kaman / Eskişehir Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Ece Altunbaş Şahin / Bingöl Üniversitesi / Genç Meslek Yüksekokulu / Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü / Sivil Savunma ve İtfaiyecilik Pr.

Dr. Öğr. Üyesi Egemen Foto / Necmettin Erbakan Üniversitesi / Fen Fakültesi / Biyoteknoloji Bölümü / Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Emrah Dokur / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Emre Esener / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Emre Güngör / Alanya Hamdullah Emin Paşa Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Dr. Öğr. Üyesi Emrah Meral / Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Ergün Ekici / Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Fadime Özdemir Koçak / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi / Sağlık Bilimleri Fakültesi / Hemşirelik Bölümü / Hemşirelik Esasları Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Fatih Evran / Düzce Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Mekatronik Mühendisliği Bölümü / Kontrol Sistemleri Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Fevziye Şüheyda Hepşen / Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü / Toprak Bilimi Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Filiz Ünal / Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bitki Koruma Bölümü / Fitopatoloji Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Gamzenur Özsin / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Kimya Mühendisliği Bölümü / Temel İşlemler ve Termodinamik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Gizem Mısır / Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Geoteknik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Gözde Koca / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi / İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi / İşletme Bölümü / Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Gürcan Atakök / Marmara Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Tasarım ve İmalat Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Gürhan Ertaşgın / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper Kamiloğlu / Bayburt Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Geoteknik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Dilmaç / Süleyman Demirel Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı

Hakem Listesi / Reviewer Board

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Korul / Eskişehir Teknik Üniversitesi / Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi / Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü / Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim Cebeci / Sakarya Üniversitesi / İşletme Fakültesi / İşletme Bölümü / Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Hanifi Çinici / Gazi Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Harun Gül / Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Havva Dinler / Uşak Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bitki Koruma Bölümü / Fitopatoloji Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Hızlan Hıncal Ağuş / İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Biyomedikal Mühendisliği Bölümü / Biyomedikal Mühendisliği Pr.

Dr. Öğr. Üyesi Hülya Durur / Ardahan Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Yazılım Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Pehlivan / Karadeniz Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Yazılım Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi İlker Burak Giresunlu / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi İlyas Kacar / Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Mekatronik Mühendisliği Bölümü / Makine ve Tasarım Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Kadriye Ergün / Balıkesir Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Kerim Kürşat Çevik / Akdeniz Üniversitesi / Manavgat Sosyal ve Beşeri Bilimler Fakültesi / Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü / İşletme Enformatiği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Aydın / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi / Endüstriyel Tasarım Bölümü / Endüstri Ürünleri Tasarımı Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin Aktan / Bartın Üniversitesi / Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi / Mekatronik Mühendisliği Bölümü / Mekatronik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fidan / Eskişehir Teknik Üniversitesi / Ulaştırma Meslek Yüksekokulu / Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü / Raylı Sistemler Elektrik ve Elektronik Teknolojisi Pr.

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Koç / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Melis Alpaslan Takan / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Merve Açıkgenç Ulaş / Fırat Üniversitesi / Mimarlık Fakültesi / Mimarlık Bölümü / Yapı Bilgisi Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Zeki Özyurt / Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ay / Yozgat Bozok Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Hidrolik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Murat Çolak / Bayburt Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Murat Kılıç / Eskişehir Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Kimya Mühendisliği Bölümü / Proses ve Reaktör Tasarımı Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Murat Şahin / Yozgat Bozok Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı

Hakem Listesi / Reviewer Board

Dr. Öğr. Üyesi Murat Tuna / Sakarya Üniversitesi / Sakarya Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu / Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü / Tıbbi Laboratuvar Teknikleri Pr.

Dr. Öğr. Üyesi Musa Özkan / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Enerji Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Cem Kasapbaşı / İstanbul Ticaret Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Mühendisliği Pr.

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Demirbilek / Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Nihan Kazak Çerçevik / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Demiryürek / Düzce Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektronik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Uzun / Erciyes Üniversitesi / Seyrani Ziraat Fakültesi / Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü / Toprak Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Olcay Boyacıoğlu / Aydın Adnan Menderes Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Gıda Mühendisliği Bölümü / Gıda Bilimleri Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Güler / Mersin Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Malzeme Bilimi Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Önder İdil / Amasya Üniversitesi / Eğitim Fakültesi / Temel Eğitim Bölümü / Okul Öncesi Eğitimi Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Özer Sevim / Kırıkkale Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Malzemesi Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Özlem Orhan / Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü / Mühendislik Temel Bilimleri Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Öznur Cumhuri / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Uygulamalı Bilimler Fakültesi / Turizm İşletmeciliği Bölümü / Turizm İşletmeciliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Rahmiye Zerrin Yarbay Şahin / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Meslek Yüksekokulu / Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü / Kimya Teknolojisi Pr.

Dr. Öğr. Üyesi Sabahattin Cömertpay / Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü / Tarımsal Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Salim Ceyhan / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Samet Şahin / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Biyomühendislik Bölümü / Biyomedikal Teknolojiler Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Seval Dernekbaşı / Sinop Üniversitesi / Su Ürünleri Fakültesi / Su Ürünleri Yetiştiriciliği Bölümü / Yetiştiricilik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Simge İrizalp / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Sinem Tunçer Gurbanov / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu / Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü / Tıbbi Laboratuvar Teknikleri Pr.

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Uzun / Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Şaban Keskin / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu / Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü / Anestezi Pr.

Hakem Listesi / Reviewer Board

Dr. Öğr. Üyesi Tuğba Tunacan / Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Ümit Çiğdem Turhan / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Vehpi Yıldırım / Erzurum Teknik Üniversitesi / Fen Fakültesi / Matematik Bölümü / Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Veysel Çoban / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Kalite Yönetimi ve Kalite Güvence Sistemleri Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin Önal / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Yaman / Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Ali Erdem Çerçevik / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Meslek Yüksekokulu / Tasarım Bölümü / İç Mekan Tasarımı Pr.

Dr. Buse Emirler / Çukurova Üniversitesi / Ceyhan Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Geoteknik Anabilim Dalı

Dr. Cenk Dağlıoğlu / İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü / Fen Fakültesi / Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü / Moleküler Biyoloji ve Genetik Anabilim Dalı

Dr. Emrah Haspolat / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı

Dr. Yıldırım Bayazıt / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Meslek Yüksekokulu / İnşaat Bölümü / İnşaat Teknolojisi Pr.

Dr. Zeynep Demir / Toprak, Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü

İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Cytotoxic Potential of <i>Solanum lycopersicum</i> Leaves Extract on Different Human Cell Lines <i>Mehlika Alper, Hatice Güneş</i>	544-552
Palmitoleik Asidin Moleküler Yapısı, Titreşim Spektrumları ve Elektronik Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi <i>Tuğba Göcen, M. Haluk Güven</i>	553-573
Geleneksel Donatılmış Betonarme Bağ Kirişlerin Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması <i>Rohullah Jamal, S. Bahadır Yüksel</i>	574-587
Silika Aerojel katkılı Alkali-Aktive Edilmiş Uçucu Kül Harçlarının Mekanik, Por Yapısı ve Mikro Yapı Özellikleri <i>Levent Bostancı</i>	588-608
A Mathematical Tumor Model with Oncolytic Virus <i>Tuğba Akman Yıldız</i>	609-620
Performance Analysis of Geosynthetic Reinforced Earth Wall by Analytical Experimental and Finite Element Methods <i>Eren Balaban, Aleš Šmejda, Mehmet İnanç Onur</i>	621-637
Süperkapasitör Uygulamaları için Elektrodepolanmış Kobalt Temelli Filmin Nikel Köpük Elektrot Üzerine Sentezi <i>Perihan Yılmaz Erdoğan, Naime Özdemir, Hüseyin Zengin, Abdalcabbar Yavuz</i>	638-648
Determination of Blood Group by Image Processing Using Digital Images <i>Hilal Atıcı, Hasan Erdiñ Koçer, Saadet Kader</i>	649-659
Factorial Design-Based Process Optimization for Continuous Quality Improvement <i>Akın Özdemir, Metin Uçurum, Hüseyin Serencam</i>	660-669
Vermikompost ile Birlikte Verilen Potasyum ve Fosforun Adsorbsiyonu Üzerine Bir Araştırma <i>Nuri Burak Aslantekin, Nuray Mücellâ Müftüoğlu</i>	670-679
Enzymatic Hydrolysis of Stingray (<i>Dasyatis pastinaca</i>) Muscle and Evaluation of Antioxidant and Copper Chelating Activities of the Hydrolysates <i>Ebru Kocadağ Kocazorbaz, Meliha Kanatsızoğlu, Hanife Tuğçe Çeker, Esra Menfaatli</i>	680-687
İndüksiyonla Sertleştirilmiş AISI 52100 Rulman Çeliğinin Taşlanmasında İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerinde Etkisinin Deneysel Analizi <i>Ufuk Kabasakaloğlu, Menderes Kam</i>	688-697
Conformable Sturm-Liouville Problem with Modified Coulomb Potential <i>Erdal Baş, Isam Najemdeen</i>	698-713
Makine Seçimi Probleminin Entropi Ağırlıklı TOPSIS Yöntemi İle Değerlendirilmesi: Bir Doğal Taş İşletmesi Örneği <i>Gözde Koca, Özüm Eğilmez</i>	714-729
Investigation into the Protective Effects of Escin on Blood Cells and Cyclophosphamide-Induced Bone Marrow Toxicity in Rats <i>Mustafa Cengiz, Adnan Ayhancı, Hatice Mehtap Kutlu</i>	730-738

A Novel Approach for Hiding Information into Mathematical Expression <i>Muhammed Milani</i>	739-754
Synthesis and Characterization of New Compounds Including Propargyl Side Chain as Potential MAO-B Inhibitor <i>Derya Osmaniye, Yusuf Özkay</i>	755-763
GTGS Gerçekleme Problemleri İçin Akıllı Çözümlerin Endüstriyel Bir Robot Manipülatöre Uygulanması <i>Tolga Yüksel</i>	764-789
Farklı Anaçlar Üzerine Aşılı Şaraplık Üzüm Çeşitlerinde Fidan Randıman ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi <i>Seda Sucu, Adem Yağcı</i>	790-801
Kaya Yünü Mineral Elyaf ve Mika Takviyeli Poliamid-6 Kompozitinin Termoset Polyester Kompozit Diske Karşı Aşınma Davranışları <i>Hüseyin Ünal, Salih Hakan Yetgin</i>	802-814
Hyperbolic Type Traveling Wave Solutions of Regularized Long Wave Equation <i>Hülya Durur, Asif Yokuş, Doğan Kaya</i>	815-824
WEKA Veri Madenciliği Yazılımının Sürümleri Arasındaki Kalite Değişimlerinin QMOOD ile İncelenmesi <i>Hakan Gündüz</i>	825-836
Kalça Protezlerinde Loft Tasarım Aracı Kesit Değişimlerinin Gerilme Miktarı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi <i>Özkan Küçük, Burak Öztürk</i>	837-849
Lif Katkılı Betonlarda Fiber Oranının Basınç Dayanımına Etkisinin Deneysel ve Nümerik İncelenmesi <i>Mohammad Manzoor Nasery, Elif Ağcakoca, Zeynep Yaman</i>	850-862
TiO₂ Katkılı Çevre Dostu Dielektrik Sıvının Elektro Erozyon Delik Delme Performanslarının Araştırılması <i>Oğuz Erdem, Süleyman Kılıç</i>	863-885
Investigating the Impact of Activity Class Number in Fall Detection Systems <i>Sıtkı Kocaoğlu</i>	886-895
Akarsu Köprülerinin HEC-RAS Programı ile Hidrolik Analizi: Fidanlık Köprüsü Örneği <i>Nuri Yılmaz, Hasan Bozkurt, Yıldırım Bayazıt</i>	896-910
Isıl İşlemin Akımsız Ni-B/Ni-B-W Dupleks Kaplamının Korozyon Direncine Etkisinin Analiz Edilmesi <i>Gökçe Dil, Ali Gökşenli, Behiye Yüksel, Faiz Muhaffel</i>	911-922
Varyans Analizi (ANOVA) ve Kovaryans Analizi (ANCOVA) İle Deney Tasarımı: Bir Gıda İşletmesinin Tedarik Süresine Etki Eden Faktörlerin Belirlenmesi <i>Beyzanur Çayır Ervural</i>	923-941
Sediment Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Bakır ve Grafit Katot Elektrotların Kullanımı <i>Namık Ak, Ayhan Orhan, Ahmet Erensoy, Nurettin Çek</i>	942-951
Implicit Rather Difference Method for Third Order Differential Equations in the Sense of Atangana-Baleanu Caputo Fractional Derivative <i>Mahmut Modanlı, Sümeyye Eker</i>	952-959

Kobalt Katkılı Kalsiyum Manganez Oksit Numunelerin Sentez ve Karakterizasyonu <i>Tankut Ateş, Süleyman Köytepe, Ömer Kaygılı</i>	960-970
Stokastik Talepli Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemine Yönelik Karşılaştırmalı Bir Yaklaşım <i>Çerkez Ağayeva, Melis Alpaslan Takan</i>	971-979
Farklı Miktarlarda Seryum ve Silisyum İçeren Alüminyum Alaşımlarının Karşılaştırılması <i>Sezgin Cengiz</i>	980-993
Cr₂O₃ Nanoyapılarının Elektrokimyasal Sentezi ve Karakterizasyonu <i>Ahmet Recep Korkmaz, Emir Çepni, Hülya Öztürk Doğan</i>	994-1003
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Mevcut Betonarme Binanın Performansının Ve Zemin Etkileşiminin Değerlendirilmesi <i>Mehmet Fatih Altan, Sinan Cansız, Osman Kaya, Çağatay Turna</i>	1004-1014
The Effect of the Barrier Mounted on the Kitchen Hood Suitable for Central Ventilation Systems on the Odour Extraction Performance <i>Yusuf Özbakış, Fehmi Erzincanlı, Engin Nas, Tolga Çeviksever</i>	1015-1025
Cam Ambalaj Üretimine Çevresel Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi <i>Burçin Atılğan Türkmen</i>	1026-1037
Kargı ve Osmancık Çevresindeki Yayla Topraklarının Aktinomiset Çeşitliliği <i>Demet Tatar, Aysel Veyisoğlu</i>	1038-1048
Diffraction Fields by a Parabolic Reflector Offset-Fed by a Line Source <i>Mustafa Kara</i>	1049-1060
Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Tabanlı Yükselten Tip DA-DA Çevirici Yapısının Denetimi ve Deneysel Analizi <i>Hakan Açıkgöz, Ö. Fatih Keçecioglu</i>	1061-1074
A Comparative Study on Wear and Thermal Behaviors of AZ91, AS91 and AM90 Magnesium Alloys <i>Biröl Akyüz</i>	1075-1083
Influence of Preheating on the Mechanical Properties of High Strength Concrete with Micro Silica Filler <i>Ibrahim Alameri, Meral Oltulu, Metehan Ardahanlı</i>	1084-1093
Roof-KSA: Binaların Semantik Bölütlemesi İçin Az Parametreye Sahip Konvolüsyonel Sinir Ağı Modeli <i>Umut Özkaya, Şaban Öztürk</i>	1094-1105
Kanser Teşhisi için Makine Öğrenmesi Tekniklerine Dayalı Yeni Bir Sınıflandırma Metodu <i>Can Eyüpoğlu, Erdem Yavuz</i>	1106-1123
Rijitleştirme Levhaları ile Güçlendirilmiş Silindirik Çelik Siloların Yapısal Davranışının İncelenmesi <i>Mehmet Erkan Efe, İlyas Devran Çelik</i>	1124-1139
Lucas Sayılarının Max Matrislerde Bir Uygulaması <i>Bahar Akyüz, Mustafa Bahşi</i>	1161-1172

Derleme Makaleleri / Review Articles

Catalytic Membrane Aided Pervaporation Applications in Esterification Reactions <i>Derya Ünlü</i>	1152-1169
A Survey on HVDC Power Transmission Systems <i>Mahir Kutay, Ahmad Mustapha Usman</i>	1170-1181
Yüksek Basınç Uygulamasının Et ve Et Ürünlerinin Güvenliği ve Raf Ömrü Açısından Rolü <i>Cemalettin Sarıçoban, Mahmood Shakir Mahmood, Rand Kadhim Bahr Al-Murjan</i>	1182-1195

Düzeltilme Makaleleri / Correction Articles

DÜZELTME - Atık Tavuk Tüyünün Zemin İyileştirmesinde Değerlendirilmesi <i>Burak Görgün, Ertaş Bozkurt, Duygu Kuru, Alev Akpınar Borazan, Nazile Ural</i>	1196-1205
DÜZELTME - Bir Konut İçin Isıtma Konseptinin Termodinamik Analizi <i>Adem Avcı , Oğuz Arslan</i>	1206-1216

Araştırma Makalesi - Research Article

***Solanum lycopersicum* Yaprak Ekstraktının Farklı İnsan Hücre Hatlarındaki Sitotoksik Potansiyeli**

Mehlika Alper¹, Hatice Güneş^{2*}

Geliş / Received: 30/01/2020

Revize / Revised: 16/06/2020

Kabul / Accepted: 25/06/2020

ÖZ

Bitkiler geleneksel olarak çeşitli hastalıklara karşı çare olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada *Solanum lycopersicum* yapraklarının etanol ekstraktının potansiyel sitotoksik etkileri A549, HeLa, PC-3, MCF-7 ve HEK293 hücre hatlarında araştırılmıştır. Hücre canlılığının belirlenmesi için MTT deneyi kullanılmıştır. Ekstarakt ile muamele edilen A549 ve HeLa hücrelerinde apoptoz ve kaspaz-3 aktivitesi araştırılmıştır. 31.25 µg mL⁻¹ konsantrasyonda, bu ekstrakt, 72 saatte test edilen kanser hücrelerinde % 50'den fazla sitotoksositeye neden olmuştur. *S. lycopersicum* ekstraktının A549 ve HeLa hücrelerinde apoptozu indüklediği belirlenmiştir. Ayrıca, *S. lycopersicum* yapraklarının ekstresi aynı hücrelerde önemli kaspaz-3 aktivitesine neden olmuştur. Bu bulgular temel olarak antikanser ajanların gelişimi için *S. lycopersicum* yaprak ekstraktının kullanımı ile ilgili araştırmalara katkıda bulunabilir.

Anahtar Kelimeler- Sitotoksosite, Domates, İnsan Kanseri Hücre Hatları, Apoptoz

¹İletişim: mehlikaalper@mu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6193-346X>)

Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: haticegunes@mu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5191-365X>)

Moleküler Biyoloji ve Biyoteknoloji Anabilimdalı, Biyoloji Bölümü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye

Cytotoxic Potential of *Solanum lycopersicum* Leaves Extract on Different Human Cell Lines

ABSTRACT

Plants have been traditionally used as a remedy against various diseases. In this study, the potential cytotoxic effects of the ethanol extract of leaves of *Solanum lycopersicum* were investigated on A549, HeLa, PC-3, MCF-7 and HEK293 cell lines. MTT assay was used for determination of cell viability. Apoptosis and activity of caspase-3 in A549 and HeLa cells treated with the extract were also investigated. At a concentration of 31.25 µg mL⁻¹, this extract caused more than 50% cell death in the cancer cells that were tested for 72 h. It was determined that the extract of *S. lycopersicum* induced apoptosis in A549 and HeLa cells. Moreover, the extract of *S. lycopersicum* leaves caused significant caspase-3 activity in same cells. These findings may basically contribute to research related with the use of the extract of leaves of *S. lycopersicum* for development of anticancer agents.

Keywords- Cytotoxicity, Tomato, Human Cancer Cell Lines, Apoptosis

I. INTRODUCTION

Cancer is one of the important reasons of death globally. The chemotherapy used for treatment of cancer target the cells non-selectively and leads to loss of both healthy and cancer cells [1]. Structurally novel chemotypes with potent and selective biological activity may be provided from plants and other natural product extracts, and therefore, the screening of such extracts is attracted attention in drug discovery programs [2]. Plant secondary metabolites that are chemical compounds and do not have direct role in the growth of plants have some biological activities such as anti-inflammatory, anticancer and other [1]. It has been reported that the biosynthesis and accumulation of secondary metabolites, which are important in defense against pathogens and environmental stress in plant, can be affected by various genetic, ontogenic, morphogenetic and environmental factors [3]. Today, scientists investigate the various effects of different parts of many plants from different regions for finding new agents to be used in treatment of cancer and other diseases.

Solanum lycopersicum L. is a familiar vegetable called as tomato and includes important phytochemicals such as carotenoids and polyphenols which are healthy constituents and known to have efficiency in cancer prevention [4]. The fruits of tomato plants are important for the human diet [5]. Also, tomato juice has been reported to have a potential on the protection of liver health [6]. Because of their therapeutic properties, the leaves of tomato are being used in worldwide in traditional medicine. For example, the minced leaves of tomato are generally applied to the skin for a cure against insect bites [7]. Moreover, the leaves of tomato are helpful in some illness, e.g optic nerve and eye weakness [8]. To our knowledge, studies on the anticancer properties of tomato leaves are relatively limited. Therefore, this study aimed to investigate the potential cytotoxic effects of the leaves of *S. lycopersicum* collected from Muğla in Turkey.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Plant Material

The leaves of *Solanum lycopersicum* (SL) were harvested in June 2015 from Muğla, Turkey. The taxonomic description was carried out and the plant material was deposited in the herbarium in Department of Biology, Mugla Sıtkı Koçman University.

B. Preparation of Crude Extract

The fresh plant leaves collected from a garden where any pesticides, herbicides or chemicals are not applied were washed with deionized water to remove the dust and dried under shade. These parts were milled to a powder by a mechanical grinder and then extracted. For the extraction, each 10 g of pulverized plant parts was mixed with 100 mL absolute ethanol (Merck, USA) for 10 h by a Soxhlet apparatus and then filtered using filter paper. After removing the ethanol by using a rotary evaporator at 42-43°C, the resulting extracts were stored at -20°C in the dark until use. The crude extract was dissolved with 10% dimethyl sulfoxide (DMSO) (Applichem, USA) to obtain stock solutions. Serial dilutions were prepared in the growth medium for use in the subsequent experiments. DMSO in a concentration not exceeding 1% was used in cells tested in the MTT assay.

C. Cell Culture Conditions and Cytotoxicity Assay

A549 (lung adenocarcinoma), HeLa (cervix adenocarcinoma), PC-3 (prostate adenocarcinoma), MCF-7 (breast adenocarcinoma) and HEK293 (embryonic kidney) human cell lines that were used in this study were obtained from ATCC and maintained in an RPMI 1640 medium (Biochrom, Germany) with stable L-glutamine (Biochrom, Germany) containing 10% heat-inactivated fetal bovine serum (FBS) (Biochrom, Germany) supplemented with 100 units mL⁻¹ of penicillin and 100 µg mL⁻¹ of streptomycin (Biochrom, Germany) and incubated at 37°C in a humidified atmosphere with 5% CO₂ and 95% air, and checked with an inverted microscope every day for their growth and morphologies. The potential cytotoxic effects of the extract against the cell lines were detected by an MTT assay [9]. The cell lines were plated separately at a density of 4x10³ cells/well into 96-well plates (Greiner, Germany) as triplicates. After for 24 h incubation at 37°C, the cell lines were exposed to extract at six different concentrations (31.25-1000 µg mL⁻¹) for 72 h. Later, the culture medium with the extract in the wells was discarded. After addition 100 µL of fresh growth medium to each well, 10 µL of the MTT (3-(4,5-Dimethyl-2-thiazolyl)-2,5-diphenyl-2H-tetrazolium Bromide) (Applichem, USA) solution (5

mg mL⁻¹ in a phosphate buffer solution) was added to each well and the microplates were incubated for another 4 h at 37°C. At the end of incubation time, the media including MTT were removed from each well and 100 µL of DMSO (Applichem, USA) was added into each well for dissolution the formazan crystals produced by living cells. Untreated cells were used as control groups. A microplate reader (Thermo Scientific, Multiskan FC, USA) was used to record the absorbance (Abs) at 540 nm for each well. The cell viability was calculated according to the following formula:

$$\text{Cell viability \%} = (\text{Mean Abs of treated cells} / \text{Mean Abs of untreated cells}) \times 100 \quad (1)$$

D. Annexin-V/PI Staining Assay

Annexin V-FITC/propidium iodide (PI) staining was performed to evaluate the percentage of apoptotic cells in treated cells via an annexin V-FITC apoptosis detection kit (eBioscience, BMSF500FI/100). The A549 and HeLa cells (5x10⁵ cells/well) were treated with 250 and 500 µg mL⁻¹ of the extract for 24 h in 6-well plates. The cells treated with DMSO (below 1%) served as control cells. After incubation time, the cells were trypsinized. The harvested cells were washed with PBS. After centrifugation at 120x g for 5 min at 4°C, the cell pellets were resuspended in 190 µL of binding buffer. Then, 5 µL of Annexin V-FITC were added to each cell suspension, and the cells were incubated in dark at room temperature for 10 min. After centrifugation, the cell pellets were again dissolved in 190 µL of binding buffer, and they were then stained by adding 10 µL of PI (20 µg mL⁻¹) at room temperature in the dark. After staining, total 10,000 cells from each sample were analyzed per measurement by flow cytometry (BD FACSCanto A, BD Biosciences) using the BD FACSDiva software v6.13.

E. Caspase-3 Activity Assay

Activity of caspase-3 was investigated by using a colorimetric assay kit (Abcam, Cambridge, UK) according to the manufacturer's protocol. A549 or HeLa cells were cultured in 6-well plates at a density of 2x10⁶ cells/well. After 24 h incubation, the cells were exposed to 500 µg mL⁻¹ of extract for 36 h. Later, 50 µL of cell lysis buffer were added to each cell pellets. This mixture was incubated for 10 min on ice. After centrifugation at 10,000 x g for 1 min, the protein concentration was detected by the Bradford assay [10]. Then, each sample with an amount of 200 µg of protein was incubated with 50 µL of 2X reaction buffer (containing 10 mM of DTT) and 5 µL of the colorimetric substrate (4 mM DEVD-p-NA) for caspase-3, during 2 h at 37°C. The absorbance at 405 nm was recorded. Control cells were untreated cells. Caspase-3 activity was expressed as the fold-increase in caspase-3 activity via comparison of the absorbance of treated cells with that of control cells.

F. Statistical Analysis

The results are expressed as mean ± standard error (SE) and were analyzed using GraphPad Prism 7.0 (GraphPad Software, Inc., San Diego, CA).

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Cytotoxic Effects of the Extracts

The increasing concentrations (31.25-1000 µg mL⁻¹) of SL ethanolic leaves (SLEL) extract were tested on the different cell lines for determination of potential cytotoxicity by MTT assay. As shown in Figure 1, all concentrations of the SLEL extract were observed to cause more than 50% cell death in all cancer cell lines tested. However, this extract at 125 µg mL⁻¹ induced about 50% cytotoxicity on the HEK293 cell line. Moreover, this extract at 31.25 µg mL⁻¹ concentration did not show significant cytotoxicity against the HEK293 cell line. These results suggested that the SLEL extract possessed potent cytotoxic effects against cancer cell lines rather than non cancerous HEK293 cell lines.

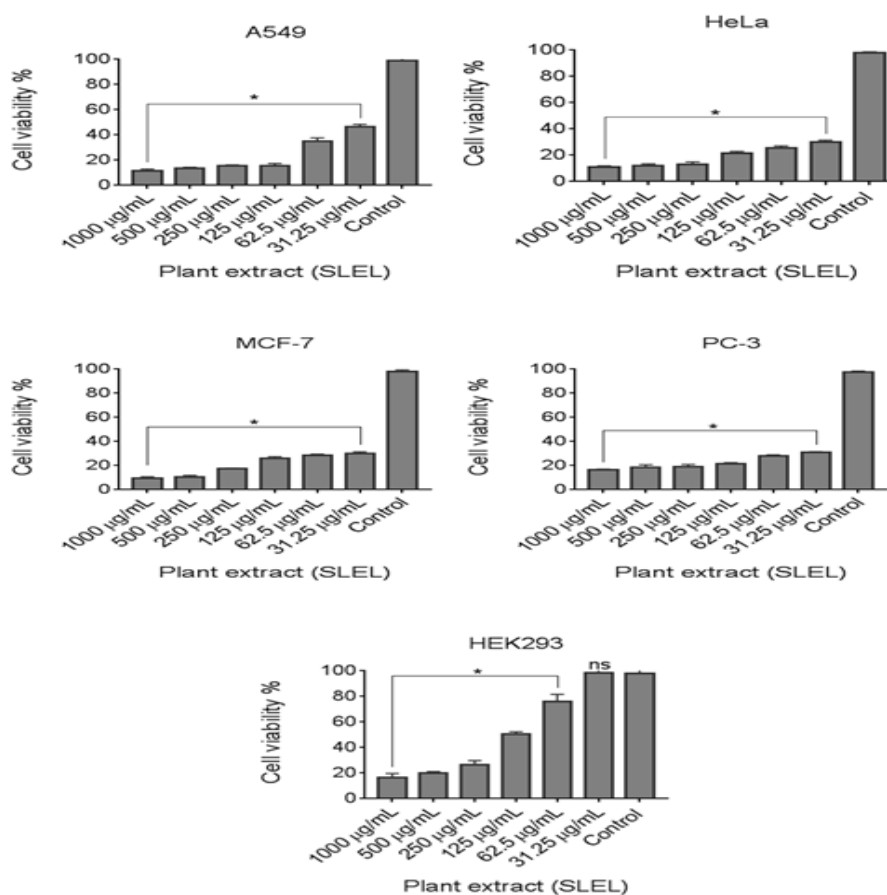


Figure 1. Cytotoxic effects of SLEL extract at different concentrations. The values obtained from three independent experiments for 72 h were presented as mean± SE. * $P < 0.05$ and ns: non-significant ($P > 0.05$) compared to control cells (one-way ANOVA and Tukey's multiple comparison test)

Plants have significant potential for the prevention and treatment of cancer due to the secondary compounds they naturally produce, and these compounds are being studied for anticancer activities that lead to the development of new drugs. [11], so it is important to investigate the anticancer properties of plants gathered from different places. In a previous study, Chik et al. [8], using different solvent for extraction unlike the current study, investigated the cytotoxicity effect of methanol extract of leaves of tomato (*Lycopersicon esculentum*) on MCF-7 breast cancer cell lines and Vero cells, and demonstrated that purified sample caused notable effects against MCF-7 with IC_{50} values of $5.85 \mu\text{g mL}^{-1}$, while Taxol had the IC_{50} value of $0.039 \mu\text{g mL}^{-1}$, and it was evaluated to be harmless on normal mammalian Vero cells (IC_{50} values of $765.6 \mu\text{g mL}^{-1}$) while Taxol provided the IC_{50} value of $0.045 \mu\text{g mL}^{-1}$. The researchers also declared that the extract of tomato leaves contains purified active fractions that have anticancer features. Additionally, Saturnino et al. [7] tested the extracts of Black Tomato leaves (var. Paul Robenson) on HEK-293, MCF-7 and C6 (rat glioma) cells for determination of their cytotoxicity. They reported that hydrophilic and chloroform extracts exhibited a comparable cytotoxic activity with cisplatin on C6, whereas the total extract did not cause a significant activity on this cell line. These researchers also stated that any significant activity was not applied by all three extracts on MCF-7 and HEK-293 cell lines. Mbaveng et al. [12], using different extract and different cells unlike the present study, studied 21 methanol extracts from 18 Cameroonian medicinal plants against leukemia CCRF-CEM cells and further tested the best extracts on a panel of human cancer cell lines, including various multi-drug-resistant (MDR) phenotypes. They showed that *Lycopersicon esculentum* leaves had IC_{50} values from $9.64 \mu\text{g/mL}$ (against breast adenocarcinoma MDA-MB-231 cells) to $57.74 \mu\text{g/mL}$ (against HepG2 cells). All these data support that the site where the plants are collected and the solvent selected for extraction may alter cytotoxic activity according to the

cell type that is used. In addition, the acute toxicity and subacute oral toxicity of methanolic extract of *Lycopersicon esculentum* leaves was explored through oral administration. A single dose of extract of leaves of *L. esculentum* has been shown to be relatively non-toxic at a dose of 5000 mg/kg b.w.. Also, it has been reported that long-term use of *L. esculentum* at orally low doses (250 and 500 mg/kg) should be encouraged and however highest dose (1000 mg/kg) should be avoided [13]. The results support that tomato leaves may be a promising agent for cancer treatment.

B. Determination of Apoptotic Cells

Since the extract at 250 and 500 $\mu\text{g mL}^{-1}$ caused more than 85% cytotoxicity on A549 and HeLa cells, annexin V-FITC/PI staining was carried out to see if apoptosis was induced in these cells after treatment with SLEL extract for 24 h. Flow cytometry was performed to demonstrate the apoptosis rate (quadrants Q4 and Q2) of the cells. The results indicated that the SLEL extract at 500 $\mu\text{g mL}^{-1}$ increased the percentage of the apoptotic cells by 82.5% in the A549 cells and 63.8% in the HeLa cells in comparison to the control cells. Importantly, the increase of percentage of apoptosis in the A549 cells treated with 250 $\mu\text{g mL}^{-1}$ of SLEL extract (82.2%) was found to be similar to cells treated with 500 $\mu\text{g mL}^{-1}$ of the extract. However, the 250 $\mu\text{g mL}^{-1}$ SLEL extract increased the percentage of apoptotic HeLa cells by 29% in comparison to the control groups. In addition, unlike HeLa cells, apoptosis in A549 cells was predominant in the early apoptotic phase (quadrant Q4). These results suggest that the SLEL extract significantly induced the apoptosis in both cell lines, especially in A549 (Figure 2).

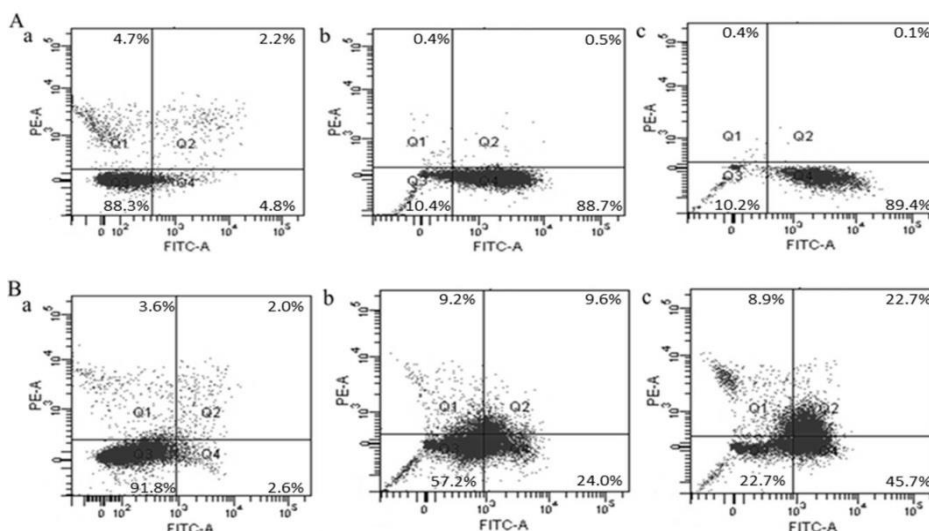


Figure 2. SLEL-induced apoptosis on A549 and HeLa cells. A549 (A) and HeLa (B) cells were treated with 250 (b) and 500 $\mu\text{g mL}^{-1}$ (c) SLEL extract for 24 h. The cells treated with DMSO served as control (a). Effects of SLEL extract on apoptosis of the cells were assessed by flow cytometry. Cells were distributed into four quadrants: Q3: viable cells, Q4: early apoptotic cells, Q2: late apoptotic cells and Q1: necrotic cells.

Apoptosis known as programmed cell death is a natural mechanism in the cells. Apoptosis, which is important in providing homeostasis, also plays a crucial act in the development of mammals. This process, which takes part in eliminating unnecessary or unwanted cells, is an extremely controlled. The apoptotic pathways, which are intracellular or extracellular, provoke death of cells by inducing caspases. Evasion of apoptosis is one of the hallmarks of cancer and the one of essential duty of apoptosis is the cancer prevention. The controlling or stopping the growth of cancer cells is among the treatment ways of cancer. Targeting apoptosis is a highly potent method for all types of cancer because evasion of apoptosis is not specific to types of cancer [14]. The pure bioactive compounds and total extracts obtained from different tomatoes or tomato products were stated to induce apoptosis in previous studies [15-18]. In addition, the extract of *Lycopersicon esculentum* leaves has been

reported to induce mostly necrosis in CCRF-CEM leukemia cells after 24 h of treatment at $2x$ IC_{50} , which the IC_{50} value was stated as $17.94 \mu\text{g/ml}$ [12]. This present study also suggested that the ethanolic extract obtained from tomato leaves was able to be a credible source for development of new agents targeting apoptosis in treatment of cancer.

C. Determination of Caspase-3 Activity

The effects of the SLEL extract on caspase-3 activation in A549 and HeLa cells were investigated because it is known that caspase-3 has a critical role in execution of apoptosis [19]. The extract at the concentration of $500 \mu\text{g mL}^{-1}$ was found to cause about an 8.5- and 4.5-fold increase in the caspase-3 activity of the A549 cells and HeLa cells, respectively in comparison to the control groups (Figure 3). These findings were appropriate with the results obtained by the flow cytometric data. The result suggested that the ethanolic tomato leaves extract may induce apoptosis in both cells. It has been stated that different cell lines or tissues may react differently to the same conditions and the same agent may stimulate apoptosis in one cell line but not in another. In addition, with the identical that induces apoptosis, the duration of the apoptosis process may vary in different cells [20] so; apoptosis rate in cells tested in the present study is likely to be different. Also, Mbaveng et al. [12] demonstrated that the extract from *Lycopersicon esculentum* leaves induced apoptosis mediated by caspases activation and increase ROS production. Considering all these results, it can be said that tomato leaves have apoptotic potential.

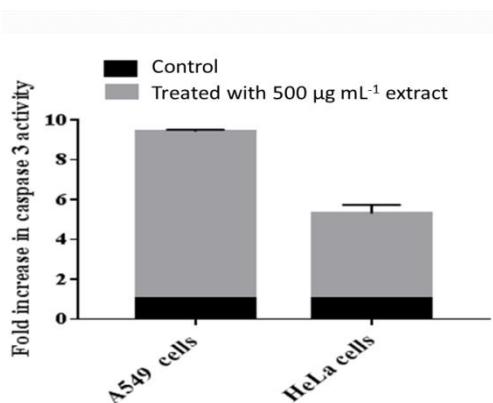


Figure 3. Caspase 3 activity in A549 and HeLa cells. A549 and HeLa cells were treated with $500 \mu\text{g mL}^{-1}$ SLEL extract for 36 h. Untreated cells served as control. The caspase-3 activities in control cells were taken as 1-fold and other activity in the treated cells were given as relative changes. The results were means (\pm SE) of three independent experiments.

IV. CONCLUSION

In conclusion, crude ethanolic leaves extract of SL at $31.25 \mu\text{g mL}^{-1}$ displayed higher cytotoxicity against all cancer cell lines tested when it was compared to the HEK293 cell line. In addition, the extract at $500 \mu\text{g mL}^{-1}$ exhibited an important apoptotic effect and caspase-3 activity in A549 and HeLa cell lines compared with the control groups. It is known that the fruits of tomato, which is an important foodstuff, have protective and therapeutic properties against diseases. Based on the results obtained from this study, it may be suggested that tomato leaves may be also be a potential source for new chemotherapeutic agents against cancer.

REFERENCES

- [1] Kooti, W., Servatyari, K., Behzadifar, M., Asadi-Samani, M., Sadeghi, F., Nouri, B., & Zare Marzouni, H. (2017). Effective Medicinal Plant in Cancer Treatment, Part 2: Review Study. *Journal of evidence-based complementary & alternative medicine*, 22(4), 982-995
- [2] Kinghorn, D. (2000). Plant secondary metabolites as potential anticancer agents and cancer chemopreventives. *Molecules*, 5, 285-288.

- [3] Yang, L., Wen, K. S., Ruan, X., Zhao, Y. X., Wei, F., & Wang, Q. (2018). Response of Plant Secondary Metabolites to Environmental Factors. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 23(4), 762.
- [4] Martí, R., Roselló, S., & Cebolla-Cornejo, J. (2016). Tomato as a source of carotenoids and polyphenols targeted to cancer prevention. *Cancers (Basel)*, 8(6), 58.
- [5] Gerszberg, A., Hnatuszko-Konka, K., Kowalczyk, T., & Kononowicz, A. K. (2015). Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in the service of biotechnology. *Plant Cell, Tissue Organ Culture*, 120(3), 881-902.
- [6] Navarro-González, I., García-Alonso, J., & Periago, M. J. (2018). Bioactive compounds of tomato: Cancer chemopreventive effects and influence on the transcriptome in hepatocytes. *Journal of Functional Foods*, 42, 271-280.
- [7] Saturnino, C., Spagnuolo, A., Palladino, C., Popolo, A., Tommonaro, G., De Prisco, R., & Pinto, A. (2013). Antiproliferative activity of “*Lycopersicon esculentum*” leaves (var. Paul Robenson): Preliminary study. *Food and Nutrition Sciences*, 4, 632-635.
- [8] Chik, W.D.W., Amid, A., & Jamal, P. (2010). Purification and cytotoxicity assay of tomato (*Lycopersicon esculentum*) leaves methanol extract as potential anticancer agent. *Journal of Applied Sciences*, 10(24), 3283-3288.
- [9] Mosmann, T. (1983). Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assays. *Journal of Immunological Methods*, 65, 55-63.
- [10] Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254
- [11] Greenwell, M., & Rahman, P.K.S.M. (2015). Medicinal Plants: Their use in anticancer treatment. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 6(10), 4103-4112.
- [12] Mbaveng, A. T., Manekeng, H. T., Nguenang, G. S., Dzotam, J. K., Kuete, V., & Efferth, T. (2018). Cytotoxicity of 18 Cameroonian medicinal plants against drug sensitive and multi-factorial drug resistant cancer cells. *Journal of Ethnopharmacology*, 222, 21-33.
- [13] Nguenang, G. S., Ntyam, A., & Kuete, V. (2020). Acute and Subacute Toxicity Profiles of the Methanol Extract of *Lycopersicon esculentum* L. Leaves (Tomato), a Botanical with Promising *In Vitro* Anticancer Potential. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine : eCAM*, 2020, 8935897.
- [14] Pfeffer, C. M., & Singh, A. T. K. (2018). Apoptosis: A target for anticancer therapy. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(2), 448.
- [15] Hwang, E.-S., & Bowen, P. E. (2005). Effects of tomato paste extracts on cell proliferation, cell-cycle arrest and apoptosis in LNCaP human prostate cancer cells. *BioFactors*, 23, 75-84.
- [16] Holzapfel, N. P., Holzapfel, B. M., Champ, S., Feldthusen, J., Clements, J., & Huttmacher, D. W. (2013). The potential role of lycopene for the prevention and therapy of prostate cancer: From molecular mechanisms to clinical evidence. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(7), 14620-14646.
- [17] Soares, N.C.P., Machado, C.L., Trindade, B.B., Lima, I.C.C., Gimba, E.R.P., Teodoro, A.J., Takiya, C., & Borojevic, R. (2017). Lycopene extracts from different tomato-based food products induce apoptosis in cultured human primary prostate cancer cells and regulate TP53, Bax and Bcl-2 transcript expression. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 18(2), 339-345.
- [18] Barone, D., Cito, L., Tommonaro, G., Abate, A.A., Penon, D., De Prisco, R., Penon, A., Forte, I.M., Benedetti, E., Cimmini, A., Indovina, P., Nicolaus, B., Pentimalli, F., & Giordano, A. 2018.

Antitumoral potential, antioxidant activity and carotenoid content of two Southern Italy tomato cultivars extracts: San Marzano and Corbarino. *Journal of Cellular Physiology*, 233, 1266-1277.

- [19] Porter, A.G., & Jänicke, R.U. (1999). Emerging roles of caspase-3 in apoptosis. *Cell Death & Differentiation*, 6, 99-104.
- [20] Sundquist T., Moravec, R. , Niles, A., O'Brien, M., Riss T., Promega Corporation (2006). Timing your apoptosis assays. *Cell Notes* 16, 18-21.

Araştırma Makalesi - Research Article

Palmitoleik Asidin Moleküler Yapısı, Titreşim Spektrumları ve Elektronik Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi

Tuğba Göcen^{1*}, M. Haluk Güven²

Geliş / Received: 22/05/2020

Revize / Revised: 04/08/2020

Kabul / Accepted: 20/10/2020

ÖZ

Bu çalışmada, Palmitoleik Asit (cis-9-Hekzadekanoik asit, C16:1, POA) 'in moleküler yapısı, titreşimsel spektroskopik ve elektronik özellikleri Gaussian 09 paket programı kullanılarak DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde incelenmiştir. POA' nın kristal yapısının henüz belirlenmediğinden, optimize edilmiş geometrik parametreleri (bağ uzunluğu, bağ açıları ve dihedral açıları), POA' ya izomorf olan Oleik asidin (OA) deneysel geometrik parametreleriyle karşılaştırılmıştır. POA' nın harmonik titreşim frekansları hesaplanmış ve literatürden elde edilen deneysel titreşim frekansları ile karşılaştırılmıştır. Titreşim frekanslarının işaretlemeleri, VEDA 4 programı kullanılarak potansiyel enerji dağılımı (PED) analizi ile gerçekleştirilmiştir. POA'nın hesaplanan yapısal parametreleri ve titreşim frekansları deneysel verilerle uyumludur. Molekülün elektronik özellikleri, en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük boş moleküler orbital (LUMO) temeline dayanılarak belirlenmiştir. HOMO-LUMO enerjileri arasındaki yüksek enerji aralığı molekülün kimyasal kararlılığa ve düşük reaktiviteye sahip olduğunu gösterir. Moleküler elektrostatik potansiyel (MEP) yüzey haritası, mulliken atomik yükleri ve sertlik, yumuşaklık, elektronegatiflik, kimyasal potansiyel, iyonizasyon potansiyeli, elektron afinitesi, elektrofilik indeks, dipol moment gibi kuantum kimyasal tanımlayıcıları moleküldeki etkileşim bölgelerini belirlemek için hesaplanmıştır. Ayrıca, POA' nın ısı kapasitesi, entropi ve entalpi gibi termodinamik özellikleri farklı sıcaklıklarda hesaplanmıştır. Tüm termodinamik parametreler, artan sıcaklıkla birlikte artmıştır.

Anahtar Kelimeler-Palmitoleik Asit, Yoğunluk Fonksiyoneli Teorisi(DFT), Titreşimsel Analiz, HOMO,LUMO

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: tugba.gocen@beun.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0078-8531>)

Ahmet Erdogan Vocational School of Health Services, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Turkey

²İletişim: halukguven@yahoo.com (<https://orcid.org/0006-0003-0475-3088>)

Department of Physics, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Turkey

The Theoretical Investigation of Molecular Structure, Vibrational Spectra and Electronic Properties of Palmitoleic Acid

ABSTRACT

In this study, the molecular structure, vibrational spectroscopic and electronic properties of Palmitoleic Acid (cis-9-Hexadecenoic acid, C16:1, POA) were investigated using the Gaussian 09 package program at DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) level. Since the crystal structure of POA has not been determined yet, the optimized geometric parameters (bond length, bond angles and dihedral angles) were compared with experimental geometric parameters of Oleic acid (OA) which is isomorphous to the POA. The harmonic vibrational frequencies of the POA were calculated and compared with the experimental vibrational frequencies which obtained from the literature. The assignments of the vibrational frequencies were performed by potential energy distribution (PED) analysis by using VEDA 4 program. The calculated structural parameters and vibrational frequencies of POA are in good agreement with the experimental data. The electronic properties of the molecule were defined on the basis of the highest occupied molecular orbital (HOMO) and the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO). The high energy gap between HOMO-LUMO energies shows that the molecule has chemical stability and low reactivity. Molecular electrostatic potential (MEP) surface map, Mulliken atomic charges and quantum chemical descriptors such as hardness, softness, electronegativity, chemical potential, ionization potential, electron affinity, electrophilic index, dipole moment were calculated to determine interaction sites in the molecule. Besides, the thermodynamic properties such as heat capacity, entropy, and enthalpy of POA at different temperatures were calculated in gas phase. All thermodynamic parameters increased with increasing temperature.

Keywords- *Palmitoleic Acid, Density Functional Theory (DFT), Vibrational Analysis, HOMO, LUMO*

I. GİRİŞ

Doymamış yağ asitleri, biyolojik organizmaların fonksiyonel aktivitelerinde kritik rol oynayan çok önemli lipit molekülleridir[1]. Doymamış yağların ve lipitlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen ana faktörler, çift bağların sayısı, pozisyonu ve konfigürasyonudur [2]. Doymamış yağ asitlerindeki çift bağlar, alkil gruplarının nispi pozisyonlarına bağlı olarak, cis veya trans konfigürasyonunda bulunabilir ve bu konfigürasyonlar biyolojik süreçlerde önemli rol oynar. Trans konfigürasyonundaki (trans yağlar) doymamış yağ asidi doğada bulunmaz ancak margarin, atıştırmalık yiyecek, kekler ve kızartma fast foodlarında kullanılmak üzere endüstriyel olarak (hidrojene yağlar) üretilir. Trans yağların obezite, safra taşı hastalığı ve koroner kalp hastalığı gibi sağlık problemleri oluşturduğu bildirilmiştir[3].

Palmitoleik asit (cis-9-Hexadecenoic acid, C16:1, POA), hidrokarbon zincirinin bir ucunda CH₃ metil grubu, bu gruptan sonra 9. ve 10. karbon atomları arasında çift bağına (doymamışlık yeri) sahip olan, hidrokarbon zincirinin diğer ucunda ise aktifliğini veren karboksilik asit (-COOH) grubu bulunan en yaygın omega-7 yağ asitlerinden biridir. POA yabani iğde ve macadamia fındığından elde edilen bitkisel yağlarda bulunan yağ asididir. POA, insan diyetinde ve kan plazmasındakitekl doymamış yağ asidi bileşenidir, tüm dokularda bulunur ancak genellikle karaciğerde daha yüksek konsantrasyonlarda bulunur. Bu yağ asidi seçici bir bakterisit etkiye sahiptir; S. aureus, Streptococcus salivarius, Fusobacterium nucleatum, Neisseria gonorrhoea ve Helikobakter pilori gibi bazı zararlı bakterilere karşı antibakteriyel aktiviteler ve bakterisidal özellikler sergilerken, faydalı bakterileri öldürmez[4]. Yapılan son çalışmalar, POA'nın cilt hiperpigmentasyonu [5], fibroz [6,7] ile ilişkili bozuklukların tedavisinde ve gram-pozitif bakterilerin neden olduğu ikincil enfeksiyonların tedavisinde kullanılan formülasyonlarda ek fayda sağladığını göstermektedir.

PAO takviyesinin ateroskleroz gibi karmaşık metabolik ve enflamatuar hastalıklara karşı önleyici özellikler sergilediği bildirilmiştir. Cis-PAO'nun ateroskleroz üzerindeki etkisinin, anti-enflamatuar etkileri ve özellikle inflamazom aktivasyonunu önleme yoluyla gerçekleştirdiği görülmektedir. Farelerde cis-PAO takviyesinin, bu biyoaktif lipitin hiperlipidemiye bağlı ER (endoplazmik retikulum) stresini, inflamazom aktivasyonunu ve enflamasyonu önlediğini ve böylece aterosklerozun ilerlemesini azalttığını göstermiştir. PAO'nun cis izomeri, hücre içi organel membranların yeniden düzenlenmesi yoluyla ateroskleroza karşı koruyucu bir etki gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca, cis-PAO takviyesinin kalp-damar hastalıklarını önleyebileceği yapılan çalışmalar sonucu gösterilmiştir [8]. Yapılan çalışmalar cis-PAO'nun aksine trans-PAO takviyesinin, lipit kaynaklı ER stresi, inflamazom aktivasyonunu ve ateroskleroza önleyemediği veya arttırmadığını göstermiştir [9].

PAO'nun molekül yapısı ve spektroskopik özellikleri üzerine yapılan deneysel çalışmalar; POA'nın α (SCT konformasyon) ve γ (SCS' konformasyon) olarak adlandırılan iki fazda kristallendiğini göstermiştir [10]. Aynı çalışmada, FT-Raman spektroskopisi ile POA'nın faz geçişi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar, POA'nın γ fazının kristal yapısı henüz tam olarak belirlenmemiş olmasına rağmen, bu formun Oleik asidin (cis-9-Octadecenoic acid) γ fazına izomorf olduğunu göstermektedir. Ayrıca, POA'nın γ formunun, Oleik asidin γ formu ile aynı spektral özellikleri sergilediği yapılan deneysel çalışmalarla desteklenmiştir [11].

Bir molekülün biyolojik özelliklerinin ve aktivitesinin moleküler yapıya bağlı olması sebebiyle, yapısal ve fonksiyonel özelliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Teorik hesaplama metodları ile ilgili çalışma alanları moleküller özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Moleküler, spektroskopik ve elektronik yapının kuantum kimyasal yöntemlerle öngürülmesi ise, deneysel verilerle tutarlı kesin sonuçlar vermesi nedeniyle değerli hale gelmiştir.

Pek çok biyolojik süreçte önemli rol oynaması ve kalp-damar hastalıklarında önleyici-koruyucu etkilere sahip oluşu POA'ya günümüzde hızla büyüyen bir popülerite kazandırmıştır. Ancak şimdiye kadar yapılan çalışmalarda POA'nın yapı-fonksiyon ilişkilerinin saptandığı teorik hesaplamalara rastlanmamıştır. Bu sebeple POA üzerinde standart hesaplama yöntemi olan DFT yardımıyla kapsamlı-sistemik bir geometrik optimizasyon ve titreşimsel analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, MEP haritalarının yorumlanması ve Mulliken yüklerinin belirlenmesi molekülün kimyasal bağlanmadaki aktif bölgelerin tayininde anahtar rol oynamaktadır. POA'nın MEP yüzeyi, yapı-aktivite ilişkisinin tahmini için haritalanmıştır. Bunun yanı sıra, POA'nın sınır moleküler orbitalleri (HOMO ve LUMO), kuantum kimyasal tanımlayıcıları ve farklı sıcaklıklarda termodinamik özellikleri hesaplanmıştır. Yaptığımız bu teorik çalışma, mevcut molekülün geometrik yapısını, titreşimsel

analizini ve elektronik özelliklerini eksiksiz bir şekilde tanımlamayı ve bu sayede ilaç-reseptör etkileşimini anlamayı amaçlamaktadır.

II. HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

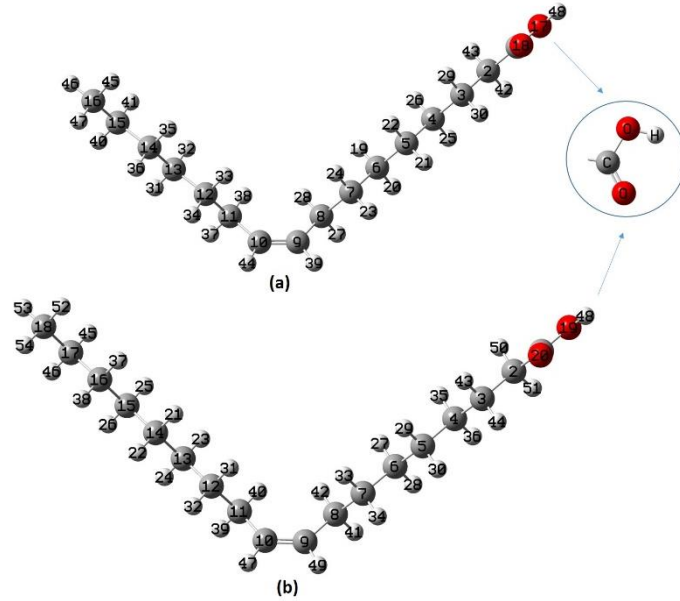
Bu çalışmada tüm kuantum kimyasal hesaplamalar, DFT (B3LYP) yöntemi 6-311++G(d,p) baz seti ve Gaussian09[12] programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Standart geometrik parametrelerden yola çıkılarak POA'nın γ formunun giriş geometrisi oluşturulmuş ve DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) teori düzeyinde optimize edilmiştir. Optimize geometrik yapıdan yola çıkılarak aynı yöntemle harmonik titreşim frekansları hesaplanmıştır. POA'nın optimize edilmiş geometrisinde sanal titreşim frekansına sahip bir titreşim modu bulunmadığından, elde edilen yapının potansiyel enerji yüzeyinde gerçek bir minimuma karşılık geldiğini söyleyebiliriz. DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) teori düzeyinde harmonik yaklaşıklıkla hesaplanan dalgasayıları ile deneysel dalgasayıları arasındaki uyumu sağlamak amacıyla, hesaplanan dalgasayıları, titreşim dalgasayılarının 1700 cm^{-1} 'e eşit veya daha büyük değerleri için $0,958$ ile ve 1700 cm^{-1} 'in altındaki değerleri için $0,983$ ile çarpılarak ölçeklendirilmiştir[13]. Spektral işaretlemeler için ayrıntılı olarak PED (Potansiyel Enerji Dağılımı) hesabı, VEDA 4 programında[14] yapılmış ayrıca GaussView 5.0.8 [15] arayüzde bulunan spektrum animasyon programından da yararlanılmıştır.

Analiz edilen molekülün reaktivitesini ve molekül içindeki yük transferine ilişkin bilgileri açıklamak için molekülün Mulliken atomik yükleri, sınır moleküler orbital (HOMO-LUMO) enerjileri, moleküler elektrostatik potansiyel (MEP) yüzeyi, kuantum kimyasal tanımlayıcıları (kimyasal sertlik, yumuşaklık, elektronegatiflik, kimyasal potansiyel, elektrofilik indeks, iyonizasyon potansiyeli, elektron afinitesi, dipol moment gibi) aynı teori düzeyinde hesaplanmıştır. Ayrıca, POA'nın termodinamik fonksiyonlarındaki değişiklikler (ısı kapasitesi, entropi ve entalpi), titreşim frekansı hesaplamalarından yola çıkılarak farklı sıcaklıklar için araştırılmıştır.

III. BULGULAR

A. Moleküler Geometri

Standart geometrik parametrelerden üretilen POA'nın ilk geometrisi GaussView 5.0.8 moleküler görüntüleme programında çizilmiş ve potansiyel enerji yüzeyinde herhangi bir kısıtlama olmaksızın minimize edilmiştir. Optimizasyon için, kutuplanma etkisini gidermek, uyarılmış ve iyonik moleküllerde elektron yoğunluğunun dağılımını modellemek için eklenen difuse ve polarize fonksiyonları içeren 6-311++G(d,p) baz seti kullanılmıştır. Molekülün yapısı, C_1 nokta grubu simetrisine sahiptir ve toplam enerjisi $-778,0377435200$ au olarak hesaplanmıştır. POA'nın optimize edilmiş geometrik parametreleri (bağ uzunluğu, bağ açıları, dihedral açıları) kristal yapısı henüz belirlenemediği için, izomorf olan ve spektral özellikleri benzerlik gösteren Oleik asidin (cis-9-Octadecenoic acid, C18:1, OA) γ formunun Cambridge yapı veri bankasından alınan (REF CSD kod: OLECAC,1226004) tek kristal X-ışını kırınımı (XRD) verileriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur. POA'nın optimizasyon sonucu elde edilen geometrik yapısı ve izomorf olan OA'nın kristal yapısı Şekil 1'de atomik numaralarıyla gösterilmiştir.



Şekil 1. (a) POA'nın B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde optimize edilmiş geometrik yapısı (b) POA'nın izomorfı olan OA'nın kristal yapısı ve karboksil (-COOH) gruplarıyla gösterimi

POA'nın molekül yapısı incelendiğinde, bir C=C bağı ile ayrılan iki bölümden oluştuğu kabul edilebilir. Molekülün bir tarafında, metil taraflı zincir olarak adlandırılan bir metil grubu bulunurken, diğer tarafında terminal grubu (karboksil taraflı zincir) olarak karboksil grubu bulunur. POA'nın γ formunun C(8)-C(9)=C(10)-C(11) olefin grubuna ait dihedral açıları sırasıyla skew ($S=120^\circ$), cis ($C=0^\circ$) ve skew' ($S'=-120^\circ$) olarak tanımlanmış ve C-C=C grubunun konformasyonun SCS' olduğu bildirilmiştir [10]. POA'nın optimize edilmiş yapısında, olefin gruba ait C(7)-C(8)-C(9)=C(10), C(8)-C(9)=C(10)-C(11) ve C(9)=C(10)-C(11)-C(12) dihedral açıları sırasıyla 119.3° , -0.2° ve -122.6° olarak hesaplanmıştır. Böylece, -C-C=C- grubunun konformasyonu, yukarıdaki dihedral açı notasyonuna uygun olarak, SCS' bulunmuştur ve γ formunun kristal yapısında önerilen yapıyla aynı konformasyona sahiptir.

C1=O18 bağının çift bağ karakteri gereği, hem deneysel hemde teorik sonuçlar incelendiğinde C1=O18 bağ uzunluğu C1-O17 bağ uzunluğundan oldukça kısadır. Deneysel ve teorik çalışmalarının farklı fazlarda yapıldığı göz önüne alındığında, genel olarak gözlemlenen farklılıklara rağmen deneysel ve teorik sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu söyleyebiliriz. Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki bu farklılıklar, katı formdaki kristal yapıda moleküller arası etkileşimlerin oluşu ve teorik sonuçların ise gaz fazında tek bir molekül için hesaplanmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 1. POA'nın DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) yöntemiyle optimize edilmiş geometrik parametrelerinin izomorfı olan OA'nın deneysel parametreleriyle karşılaştırılması.

Geometrik Parametreler	Hesaplanan	Deneysel*
Bağ Uzunlukları (Å)		
C(1)=O(18)	1,205	1,246
C(1)-O(17)	1,360	1,334
C(1)-C(2)	1,510	1,498
C(2)-C(3)	1,528	1,505
C(3)-C(4)	1,533	1,546
C(4)-C(5)	1,533	1,542
C(5)-C(6)	1,533	1,494
C(6)-C(7)	1,532	1,536
C(7)-C(8)	1,540	1,557
C(9)-C(8)	1,504	1,503

Tablo 1.(devam ediyor)

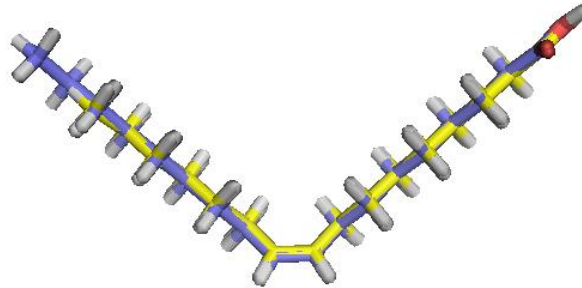
Geometrik Parametreler	Hesaplanan	Deneysel*
Bağ Uzunlukları (Å)		
C(9)=C(10)	1,337	1,389
C(10)-C(11)	1,504	1,513
C(11)-C(12)	1,540	1,547
C(12)-C(13)	1,532	1,564
C(13)-C(14)	1,533	1,555
C(14)-C(15)	1,533	1,502
C(15)-C(16)	1,532	1,508
O(17)-H	0,969	1,158
O.....H	2,288	2,442
Bağ Açılımları^(o)		
O(18)-C(1)-O(17)	122,2	119,4
C(2)-C(1)-O(18)	126,5	120,6
C(1)-C(2)-C(3)	113,8	115,6
C(2)-C(3)-C(4)	112,6	106,9
C(3)-C(4)-C(5)	113,2	111,2
C(4)-C(5)-C(6)	113,6	110,3
C(5)-C(6)-C(7)	113,5	112,2
C(6)-C(7)-C(8)	113,3	111,0
C(7)-C(8)-C(9)	112,8	105,8
C(8)-C(9)-C(10)	128,3	125,8
C(9)-C(10)-C(11)	128,4	125,6
C(10)-C(11)-C(12)	112,7	107,4
C(11)-C(12)-C(13)	113,4	110,7
C(12)-C(13)-C(14)	113,5	112,3
C(13)-C(14)-C(15)	113,7	114,2
C(14)-C(15)-C(16)	113,3	115,7
Dihedral Açılımları^(o)		
O(18)-C(1)-O(17)-H(52)	0,0	-17,2
C(2)-C(1)-O(17)-H(52)	-180,0	152,2
C(3)-C(2)-C(1)-O(18)	0,2	-18,1
C(3)-C(2)-C(1)-O(17)	-179,8	151,3
C(1)-C(2)-C(3)-C(4)	-179,7	174,2
C(2)-C(3)-C(4)-C(5)	180,0	-177,3
C(3)-C(4)-C(5)-C(6)	180,0	177,3
C(4)-C(5)-C(6)-C(7)	179,6	174,4
C(5)-C(6)-C(7)-C(8)	179,6	179,9
C(6)-C(7)-C(8)-C(9)	176,1	175,6
C(7)-C(8)-C(9)-C(10)	119,3	132,4
C(8)-C(9)-C(10)-C(11)	-0,2	-1,8
C(9)-C(10)-C(11)-C(12)	-122,6	-127,5
C(10)-C(11)-C(12)-C(13)	-176,9	-171,2
C(11)-C(12)-C(13)-C(14)	179,7	175,1
C(12)-C(13)-C(14)-C(15)	-179,9	178,5
C(13)-C(14)-C(15)-C(16)	179,8	-176,9

*Ref [16]

Tablo 1'deki sonuçlar incelendiğinde, hidrokarbon zinciri boyunca çift bağlı karbon içeren (C=C-C, C-C=C) bağ açıları 120°'den biraz büyük, diğerleri (C-C-C) ise 120°'den biraz küçüktür.

Teorik olarak hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen geometrik parametreler (bağ uzunlukları, bağ açıları ve dihedral açıları) arasında korelasyon grafikleri çizilmiş ve korelasyon grafiklerinden korelasyon katsayıları (R²) bağ uzunlukları, bağ açıları ve dihedral açıları için sırasıyla R²=0,9409, R²=0,8480 ve R²=0,9623 olarak elde edilmiştir. Bu değerler elde edilen teorik sonuçların deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca, teorik ve deneysel geometriler arasındaki uyumu görselleştirmek amacıyla POA'nın B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde optimize edilmiş geometrik yapısı ve OA'nın X-ray kristal yapısının overlay diyagramı Şekil2'de gösterilmiştir. Bütün bunlara ek olarak POA'nın teorik olarak hesaplanan geometrik parametrelerinin kristal yapısı bilenen Erüsik asit (cis-13-Docosenoic acid, C22:1) gibi benzer yapıya sahip tekli doymamış yağ asitlerinin geometrik parametreleriyle kıyaslandığında, hidrokarbon zincir boyunca C-C-C-C

dihedral, C-C-C bağ açıları ve C-C, bağ uzunluklarının deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir [16,17].



Şekil 2. POA' nın optimize geometrik yapısı (sarı) ve OA' nın X-ray kristal yapısının (mavi) overlay diyagramı

B. Titreşimsel analiz

POA molekülü 12 metilen (CH₂), bir metil (CH₃) ve bir karboksilik (COOH) gruptan oluşur ve 138 titreşim moduna sahiptir. Molekülün optimize olmuş geometrik parametreleri üzerinden DFT/B3LYP yöntemi ve 6-311G++(d,p) baz seti kullanılarak, tüm titreşim modları, onlara ait dalgasayı ve IR şiddet değerleri hesaplanmıştır. POA' nın deneysel ATRFT-IR spektrumundan alınmış [18] ve spektrumdaki karakteristik bandların işaretlemesi yapılmıştır. DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde harmonik yaklaşımla hesaplanan dalgasayı ile deneysel dalgasayı arasındaki farklılıkları azaltmak amacıyla, hesaplanan dalgasayı, titreşim dalgasayısının 1700 cm⁻¹'e eşit veya daha büyük değerleri için 0,958 ile ve 1700 cm⁻¹ 'in altındaki değerleri için 0,983 ile çarpılarak ölçeklendirilmiştir.

POA' nın DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanan temel titreşim modlarına ait harmonik titreşim frekansları (cm⁻¹), infrared şiddetleri (km/mol), deneysel titreşim frekansları (cm⁻¹), titreşim modlarının PED (Potansiyel enerji katkısı) değerleri ve spektral işaretlemeleri Tablo 2' de listelenmiştir. POA' nın teorik (ölçeklendirilmiş) infrared spektrumu ve deneysel ATR FT-IR spektrumu karşılaştırmalı olarak Şekil 3' te gösterilmiştir. Tartışma kolaylığı açısından POA' nın temel titreşim modları CH₃ (metil), CH₂ (metilen), C=C ve karboksil (COOH) gruplarının gerilme ve bükülme titreşimleri grup frekansları göz önüne alınarak incelenmiştir.

Tablo 2. POA' nın B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanan harmonik titreşim frekanslarının (cm⁻¹) ve deneysel (FT-IR) titreşim frekansları ile karşılaştırması. I_{IR} infrared şiddetleri (km/mol) ve titreşim modu işaretlemeleri.

B3LYP/6-311++G(d,p)			Deneysel (FTIR) ^a	İşaretleme ^b PED ^c (%)
Hesaplanan	Ölçeklendirilmiş	I _{IR}		
3759	3601	66	3007	v(OH) (100)
3124	2993	51		v(CH) (98)
3100	2970	15		v(CH) (96)
3082	2953	46	2956	v _a (CH ₂) (91)
3078	2949	80		v _a (CH ₃) (90)
3077	2948	60		v _a (CH ₂) (92)
3071	2942	48		v _a (CH ₂) (88)
3060	2932	57		v _a (CH ₂) (82)
3053	2924	24		v _a (CH ₂) (86)
3049	2921	63	2922	v _a (CH ₂) (96)
3046	2918	29		v _a (CH ₂) (86)
3037	2909	42		v _a (CH ₂) (90)
3036	2909	7		v _a (CH ₂) (88)
3035	2907	0		v _a (CH ₂) (87)
3027	2900	3		v _s (CH ₂) (90)
3020	2893	7		v _a (CH ₂) (90)
3018	2891	5		v _a (CH ₂) (90)
3017	2891	52		v _s (CH ₃) (92)

Tablo 2.(devam ediyor)

B3LYP/6-311++G(d,p)		I _{IR}	Deneysel (FTIR) ^a	İşaretleme ^b PED ^c (%)
Hesaplanan	Ölçeklendirilmiş			
3011	2885	40		$\nu_a(\text{CH}_2)$ (87)
3010	2884	98	2860	$\nu_s(\text{CH}_2)$ (93)
3009	2883	45		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (89)
3008	2882	23		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (90)
3004	2878	0		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (87)
3002	2876	7		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (88)
2995	2869	15		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (93)
2994	2868	7		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (91)
2993	2867	2		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (86)
2992	2867	5		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (83)
2992	2866	9		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (87)
2989	2863	8		$\nu_s(\text{CH}_2)$ (89)
1812	1736	299	1703	$\nu(\text{C}=\text{O})$ (89)
1715	1643	2	1658	$\nu(\text{C}=\text{C})$ (72)+ $\rho(\text{CH})$ (22)
1514	1489	17		$\delta(\text{CH}_2)$ (84)
1513	1488	7		$\delta(\text{CH}_2)$ (83)
1506	1481	1		$\delta(\text{CH}_2)$ (81)
1505	1479	1		$\delta(\text{CH}_2)$ (78)
1498	1473	8		$\delta(\text{CH}_2)$ (90)
1497	1471	4		$\delta(\text{CH}_2)$ (77)
1494	1469	1	1465	$\delta(\text{CH}_2)$ (79)
1490	1465	1		$\delta(\text{CH}_2)$ (76)
1487	1462	0	1437	<i>sciss</i> (CH_2) (89)
1486	1461	0		$\delta(\text{CH}_2)$ (78)
1486	1461	0		$\delta(\text{CH}_2)$ (84)
1485	1460	0		$\delta(\text{CH}_2)$ (76)
1478	1453	0		$\delta(\text{CH}_2)$ (85)
1460	1435	16	1413	$\delta(\text{CH}_2)$ (92)
1440	1415	12		$\delta(\text{CH})$ (70)
1417	1393	36		$\omega(\text{CH}_2)$ (85)
1412	1388	2	1380	$\delta(\text{CH}_2)$ (93)
1403	1380	2		$\omega(\text{CH}_2)$ (81)
1400	1376	1		$\omega(\text{CH}_2)$ (79)
1395	1371	10		$\omega(\text{CH}_2)$ (74)
1391	1367	1		$\omega(\text{CH}_2)$ (83)
1372	1348	19		$\omega(\text{CH}_2)$ (76)
1358	1335	5		$\omega(\text{CH}_2)$ (74)
1340	1317	1		$\gamma(\text{CH}_2)$ (82)
1339	1316	2		$\gamma(\text{CH}_2)$ (81)
1337	1314	5		$\gamma(\text{CH}_2)$ (77)
1336	1313	5		$\gamma(\text{CH}_2)$ (72)
1329	1307	0		<i>t</i> (CH_2) (75)
1326	1303	0		$\gamma(\text{CH}_2)$ (72)
1320	1298	1		$\gamma(\text{CH}_2)$ (72)
1316	1294	1		$\gamma(\text{CH}_2)$ (72)
1308	1286	1	1287	$\omega(\text{CH}_2)$ (77)
1302	1280	4		$\delta(\text{COH})$ (76)
1299	1277	1		$\delta(\text{CH})$ (70)
1281	1259	0	1248	$\gamma(\text{CH}_2)$ (77)
1275	1253	2		$\gamma(\text{CH}_2)$ (65)
1273	1251	8		$\delta(\text{COH})$ (75)+ $\omega(\text{CH}_2)$ (23)
1247	1226	1		$\gamma(\text{CH}_2)$ (65)
1236	1215	2		$\gamma(\text{CH}_2)$ (65)
1234	1213	8		$\gamma(\text{CH}_2)$ (65)
1220	1199	0		$\gamma(\text{CH}_2)$ (62)
1181	1161	0		$\gamma(\text{CH}_2)$ (67)+ $\nu(\text{C}-\text{C})$ (10)
1144	1125	134	1226	$\nu(\text{C}-\text{O})$ (47)+ $\delta(\text{COH})$ (31)
1142	1122	121		$\gamma(\text{CH}_2)$ (62)
1132	1112	2		$\gamma(\text{CH}_2)$ (64)
1110	1091	4		$\gamma(\text{CH}_2)$ (65)
1098	1079	63		$\delta(\text{CCC})$ (42)+ $\nu(\text{C}-\text{C})$ (17)+ $\nu(\text{C}-\text{O})$ (14)
1067	1049	1		$\nu(\text{C}-\text{C})$ (49)+ <i>t</i> (CH_2) (18)+ $\delta(\text{CH})$ (10)
1064	1046	3		$\nu(\text{C}-\text{C})$ (76)
1062	1044	2		$\nu(\text{C}-\text{C})$ (69)
1054	1037	8		$\nu(\text{C}-\text{C})$ (48)+ $\delta(\text{CH})$ (10)

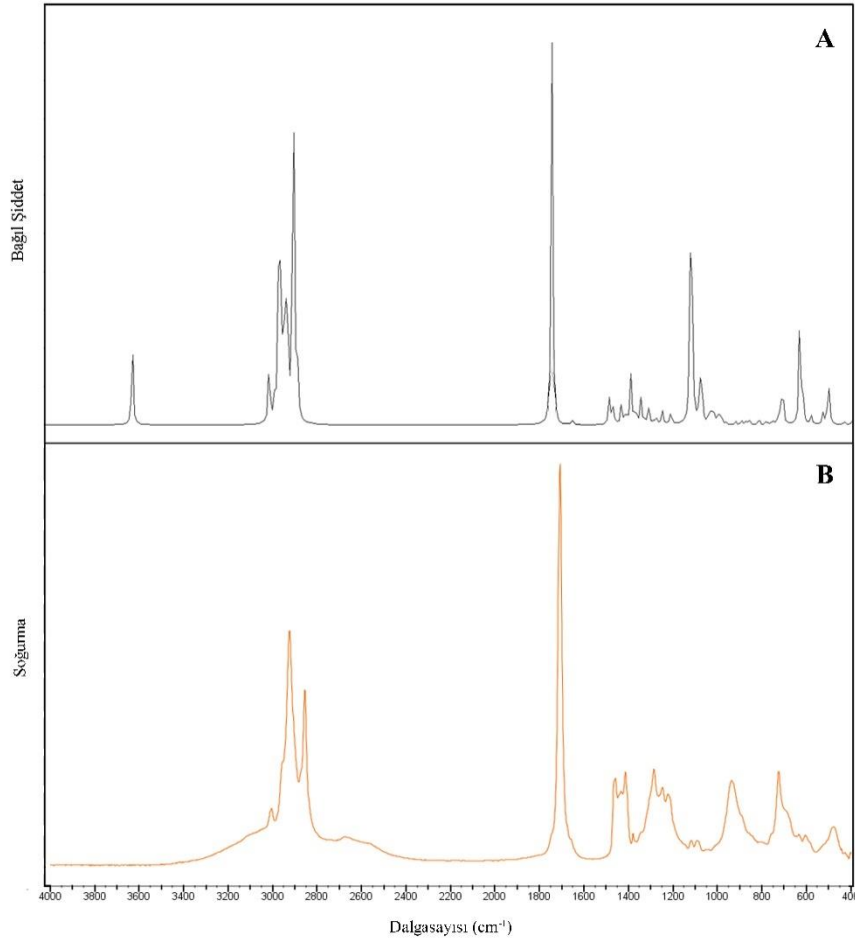
Tablo 2.(devam ediyor)

B3LYP/6-311++G(d,p)		I _{IR}	Deneysel (FTIR) ^a	İşaretleme ^b PED ^c (%)
Hesaplanan	Ölçeklendirilmiş			
1062	1044	2		$\nu(C - C)$ (69)
1054	1037	8		$\nu(C - C)$ (48)+ $\delta(CH)$ (10)
1046	1028	3		$\nu(C - C)$ (42)+ $\delta(CH)$ (25)
1043	1025	11		$\nu(C - C)$ (58)+ $\gamma(CH)$ (19)
1025	1008	5		$\nu(C - C)$ (60)+ $\gamma(CH)$ (23)
1017	1000	4		$\gamma(CH)$ (74)+ $\delta(CCC)$ (17)
1016	999	4		$\nu(C - C)$ (60)+ $\gamma(CH)$ (23)
1009	992	4		$\gamma(CH)$ (60)
1003	986	2		$\nu(C - C)$ (62)
998	981	0		$\nu(C - C)$ (37) + $\gamma(CH_2)$ (16)
984	968	1		$\gamma(CH_2)$ (58)
939	923	2		$\nu(C - C)$ (48)+ $(CC = CC)$ (25)
913	898	3		$\rho(CH_2)$ (40)+ $\gamma(CH)$ (17)
896	881	1		$\nu(C - C)$ (34)+ $\rho(CH_3)$ (28)
891	875	2		$\nu(C - C)$ (40) + $\rho(CH_3)$ (25)
878	863	3		$\nu(C - C)$ (59)+ $\nu(C - O)$ (18)
836	821	5		$\gamma(CH_2)$ (69)
801	788	2		$\rho(CH_2)$ (72)
773	760	3		$\gamma(CH_2)$ (70)
747	734	5		$\rho(CH_2)$ (72)
739	726	7	727	$\rho(CH_2)$ (75)
732	719	2		$\rho(CH_2)$ (72)
731	719	6		$\rho(CH_2)$ (72)
727	715	27		$\gamma(CH)$ (67)+ $\rho(CH_2)$ (12)
650	639	86		$\tau(COOH)$ (86)
637	626	25	632	$\delta(OCCO)$ (71) + $\nu(C - O)$ (16)
598	588	6	602	$\delta(CCC)$ (32) + $\nu(C - C)$ (15)+ $\gamma(CH_2)$ (11)
543	533	9		$\delta(CCC)$ (53) + $\gamma(CH_2)$ (13)
520	511	28		$\tau(COOH)$ (78)
515	507	11		$\delta(CCO)$ (63)
458	450	1		$\delta(CCC)$ (59)
445	437	2		$\delta(CCC)$ (61)
411	404	4		$\delta(CCC)$ (56) + $\delta(CCO)$ (20)
382	376	2		$\delta(CCC)$ (61)+ $\nu(C - C)$ (12)
309	303	0		$\delta(CCC)$ (53)+ $\tau(CC = CH)$ (12)
305	300	1		$\delta(CCC)$ (57)
263	258	0		$\delta(CCC)$ (50)+ $\tau(CCCH)$ (13)
238	234	0		$\tau(CH_3)$ (92)
217	213	1		$\delta(CCC)$ (53)+ $\nu(C - C)$ (10)
201	198	0		$\delta(CCC)$ (43) + $\tau(CCCC)$ (15)
176	173	0		$\tau(CCCC)$ (38)+ $\delta(CCC)$ (26) + $\nu(C - C)$ (10)
155	152	0		$\tau(CCCC)$ (57)
152	149	0		$\tau(CCCC)$ (57)
142	140	0		$\tau(CCCC)$ (57)
132	130	0		$\tau(CCCC)$ (66)
117	115	1		$\delta(CCC)$ (59)
103	102	0		$\delta(CCC)$ (62)
97	95	0		$\tau(CCCH)$ (58)+ $\tau(CCCC)$ (13)
81	79	0		$\tau(HCCH)$ (56)
76	74	0		$\tau(CCCC)$ (73)
53	52	0		$\tau(CCCH)$ (55)+ $\tau(OCCC)$ (23)+ $\tau(CH_3)$ (10)
49	48	0		$\tau(CCCH)$ (56)+ $\tau(CCCC)$ (15)+ $\tau(OCCC)$ (10)
43	42	0		$\tau(CCCC)$ (42) + $\tau(CCCH)$ (26)
37	36	0		$\tau(CCCC)$ (67)
26	26	0		$\tau(CCCC)$ (72)
19	19	2		$\tau(CCCO)$ (62)+ $\tau(CCCC)$ (23) + $(CCCH)$ (12)
8	8	0		$\tau(CCCC)$ (77)

^aRef[18]

^bTitreşim türleri: ν ; gerilme, s ; simetrik, a ; asimetrik, δ ; deformasyon, $sciss$; makaslama, γ ; düzlemdışı bükülme, ω ; dalgalanma, ρ ; sallanma, t ;kivırma, τ ; torsiyon

^cPED; Normal modların potansiyel enerji katkısı. %10' un altındaki PED' ler dahil değildir.



Şekil 3. POA' nın A)gaz fazındaki teorik IR spektrumu B) sıvı formdaki ATR FT-IR spektrumu

Doymamış yağ asitleri zincirindeki çift bağlara bağlı olan C-H grubunun bağ gerilme titreşim moduna ait $\nu(\text{CH})$ bandı infrared spektrumunda 3000 cm^{-1} 'e yakın bir bölgede gözlenir. POA'nın FT-IR spektrumunda 3007 cm^{-1} 'de işaretlenen band, *cis* konfigürasyondaki çift C=C bağına bağlı olan C-H'lar için $\nu(\text{CH})$ gerilme titreşim moduna ait banttır[19]. Bu band deneysel spektrumda 3007 cm^{-1} 'de işaretlenirken teorik (ölçeklendirilmiş) spektrumda ise 2993 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır.

CH gerilme bölgesindeki spektral özellikler, CH_2 bakımından zengin moleküllerin spektral analizinde çok faydalıdır, çünkü bu özellikler faz geçişi ile dramatik bir şekilde değişirler. Metilen gruplarının gerilme titreşimleri $2800\text{-}3000 \text{ cm}^{-1}$ ' lik bölgeye yayılmış çok karmaşık bir bantta bulunur. CH_2 grubun asimetric ve simetric gerilme titreşimleri deneysel FT-IR spektrumunda sırasıyla 2922 cm^{-1} ve 2860 cm^{-1} olarak işaretlenirken, teorik spektrumda sırasıyla 2921 cm^{-1} ve 2884 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır. POA'nın FT-IR spektrumunda 1465 cm^{-1} 'de gözlenen band $\delta(\text{CH}_2)$ düzlem içi açılı bükülme modu olarak işaretlenmiş, teorik spektrumda 1469 cm^{-1} de hesaplanmıştır. FT-IR spektrumunda 1413 cm^{-1} 'de işaretlenen band ise, COOH grubuna komşu olan CH_2 grubuna ait $\delta(\text{CH}_2)$ düzlem içi açılı bükülme modu olarak işaretlenirken,teorik spektrumda 1435 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır.

Metilen grup sallanma titreşimleri lipidlerin deneysel spektrumunda genellikle 720 cm^{-1} civarında gözlenir. $\rho(\text{CH}_2)$ sallanma modu POA'nın deneysel spektrumunda 727 cm^{-1} 'de olarak işaretlenirken, bu mod teorik spektrumda 726 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır.

CH₃ grubunun simetrik ve asimetrik gerilme titreşimleri genel olarak 2800–3000 cm⁻¹ dalgasayısı bölgesinde gözlenmektedir. POA'nın deneysel spektrumunda metil grubuna ait ν_a(CH₃) asimetrik gerilme titreşim modu 2956 cm⁻¹'de işaretlenirken, teorik spektrumda 2949 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Teorik spektrumda 2890 cm⁻¹'de hesaplanan ν_s(CH₃) simetrik gerilme titreşim modu, bu bölgedeki diğer C-H modları tarafından perdelenmiş deneysel spektrumda işaretlenememiştir.

Metil grup asimetrik bükülme modu yağ asitlerinde yaklaşık 1460 cm⁻¹ civarında gözlenir. δ(CH₃) asimetrik bükülme modu 1473 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Deneysel ATR FT-IR spektrumunda δ(CH₃) simetrik bükülme modu ise 1380 cm⁻¹'de gözlenmiş, teorik spektrumda bu mod 1388 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Metil grup burulma modu τ(CH₃) deneysel spektrumda genellikle 240 cm⁻¹ civarında gözlenir ancak genel olarak düşük IR şiddetine sahiptir. POA'nın teorik spektrumunda bu mod 234 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Bir karboksilik asit, aynı karbon atomuna bağlı bir hidroksil grubuna (OH) sahip bir karbonil grubu (C=O) içeren bir fonksiyondur. Bu nedenle karboksilik asitlerin infrared spektrumlarında bu grubun CO, COH ve OH titreşimleri beklenir [20]. Moleküle bağlı hidroksil grubuna ait ν(OH) gerilme bandı 3600-3200 cm⁻¹ spektral aralığında gözlenir. Bu mod POA'nın teorik spektrumunda 3601 cm⁻¹ olarak hesaplanırken, deneysel FT-IR spektrumunda gözlenememiştir. Bu durum dimerlerin COOH grupları arasındaki hidrojen bağı ile açıklanır. Karboksilik asitlerin genel olarak, güçlü dimerik kompleksler oluşturduğu bilinmektedir [21]. Karboksilik asitlerdeki hidrojen bağları oldukça güçlü olup özellikle sıvı fazda moleküller dimer yapıda birbirine bağlanmıştır. Deneysel FT-IR spektrumunda O-H gerilme titreşim moduna ait titreşim bandının gözlenmemesi ve 938 cm⁻¹'de γ(OH) düzlem dışı açı bükülme bandının gözlenmesi (Tablo 2' de τ(CO..OH) burulma titreşim modu), POA moleküllerinin dimer yapıda birbirine H-bağı ile bağlandığını göstermektedir.

ν(C=O) gerilme bandı, molekülün fiziksel durumuna, komşu yerleşimlerin elektronik etkilerine, konjugasyona, molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağına bağlı olarak 1870-1540 cm⁻¹ bölgesinde gözlenir[22]. Bu titreşim modu, karboksilik asitlerin infrared spektrumlarında 1760-1690 cm⁻¹ aralığında gözlenen şiddetli bir banttır. Karboksilik grubun karakteristik titreşimi olan ν(C=O) gerilme modu 1736 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır ve spektrumdaki en şiddetli moddur. Bu mod deneysel spektrumda 1703 cm⁻¹ 'de işaretlenen spektrumun en yüksek şiddetli modudur. Deneysel spektrumda bu modun teorik spektrumda işaretlenenden daha düşük dalgasayılarına kaymasının sebebi, sıvı formda dimerler arasında oluşan moleküller arası hidrojen bağıdır. Karboksilik asit dimer yapı titreşim spektrumlarında 1210-1320 cm⁻¹ bölgesinde gözlenen ν(C-O) gerilme modu, POA'nın deneysel FT-IR spektrumunda moleküller arası hidrojen bağı sebebiyle teorik spektruma göre daha yüksek dalgasayısında 1226 cm⁻¹'de işaretlenmiştir. Bu mod, 1125 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır. ν(C-O) gerilmesi düzlem içi δ(COH) bükülme titreşimi ile karışık moddur. PED hesaplamaları bunun karışık bir mod olduğunu ortaya koymaktadır. Bu modun % 47' si ν(C-O) gerilmesi ve % 31'lik düzlem içi δ(COH) açı bükülmesinden kaynaklanmaktadır.

δ(OCO) düzlem içi açı bükülme modu teorik spektrumda cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır POA'nın ATR-FTIR spektrumunda 632 cm⁻¹'de gözlenen band, δ(OCO) modu olarak işaretlenmiştir.

ν(C=C) gerilme titreşimleri alifatik hidrokarbon zincirlerinde 1680-1600 cm⁻¹ bölgesinde gözlenir. ν(C=C) gerilme titreşim bandı, deneysel FT-IR spektrumunda ν(C=O) şiddetli bandının yanında çok az şiddette, 1658 cm⁻¹'de bir omuz titreşimi olarak gözlenirken, teorik analiz sonucu 1643 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

C. Elektronik Özellikler

Moleküler etkileşimde, birbirleriyle etkileşen iki önemli yörünge vardır. Bunlardan birincisi HOMO elektron verme yeteneğini temsil ederken, diğeri elektron alıcısı olan LUMO' dur. Bu orbitallere molekülün sınır orbitalleri denir ve bir molekülün kimyasal kararlılığını, reaktivitesini anlamının temelini oluşturması nedeniyle oldukça önemlidir. Orbitaller, elektron yoğunluğu hakkında da bilgi sağlar ve bu da molekülün hangi kısmının bir enerji transfer olayına en aktif şekilde katıldığını belirlemede kullanılır [23].

HOMO ve LUMO enerjileri arasındaki enerji farkına (ΔE) enerji aralığı denir ve molekülün kimyasal kararlılığının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Molekül orbitallerinin enerji seviyeleri birbirine ne kadar yakınsa, yani HOMO-LUMO enerji aralığı ne kadar küçük ise molekül içinde elektronik transferler ve reaktantların reaksiyona girmesi de o kadar kolay olacaktır. Kısacası en küçük HOMO-LUMO boşluğuna sahip

molekül daha reaktiftir. HOMO-LUMO enerji aralığının daha büyük olması ise molekülün kimyasal olarak daha kararlı olduğu anlamına gelmektedir [24].

Kimyasal sertlik ve yumuşaklık ise diğer önemli elektronik parametreler içinde ilk sıralarda yer alır. Bu parametreler kimyasal reaksiyon için büyük önem taşır ve kimyasal kararlılığının bir ölçütüdür. Kimyasal sertlik (η) ve yumuşaklık (S), HOMO ve LUMO enerjilerinden aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir [25].

$$\eta = \frac{\Delta E}{2} \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

Molekülün büyük HOMO-LUMO boşluğu onun kimyasal olarak sert bir molekül olduğu ve küçük HOMO-LUMO boşluğu ise yumuşak bir molekül olduğu anlamına gelir [26]. Daha düşük sertlik değeri daha yüksek reaktiviteye işaret eder, bu da küçük bir HOMO-LUMO aralığına sahip bir molekülün daha reaktif ve daha yumuşak olduğu anlamına gelir. Koopmans [27] teoremine göre, kimyasal bileşiklerin HOMO enerjisi doğrudan iyonizasyon potansiyeli (I) ile ilişkili iken, LUMO enerjisi ise doğrudan elektron affinitesi (A) ile ilişkilidir. Pozitif elektron affinitesine sahip bir molekül veya atom, elektron alıcısı olarak adlandırılır ve yük transfer reaksiyonlarına maruz kalabilir. Ayrıca bir molekülün elektron verme gücü, bir elektronun HOMO'dan uzaklaştırılması için gerekli enerji olan iyonizasyon potansiyeli ile ölçülür. İyonizasyon potansiyeli ve elektron affinitesi aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$I = -E_{\text{HOMO}} \quad (3)$$

$$A = -E_{\text{LUMO}} \quad (4)$$

Elektronegatiflik (χ), bir atomun veya fonksiyonel grubun elektronları veya elektron yoğunluğunu kendisine çekme yeteneğini tanımlayan kimyasal bir özelliktir ve aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\chi = (I+A)/2 \quad (5)$$

Elektrofililik indeksi (ω), moleküler sistem çevreden ek bir elektronik yük aldığı anda enerjideki kararlılığı ölçüsüdür [28]. Fiziksel olarak, kimyasal potansiyel (μ) dengeki bir sistemden elektronların ayrılma eğilimini ifade eder [29]. Kimyasal potansiyel ne kadar büyük olursa, bileşik o kadar az kararlı veya daha reaktiftir. Hem molekül içindeki elektron transferi hem de kararlılık hakkında bilgi içeren kimyasal potansiyel ve elektrofililik indeksi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\mu = -(I+A)/2 \quad (6)$$

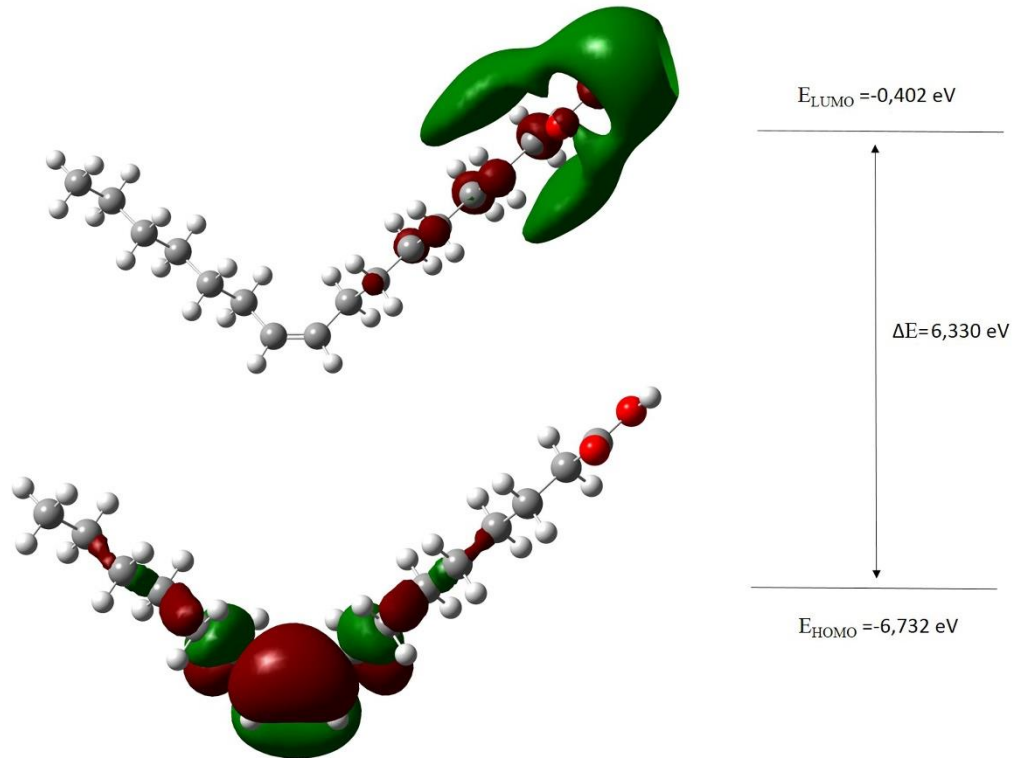
$$\omega = \mu^2 / 2\eta \quad (7)$$

POA molekülü için En Yüksek Dolu Moleküler Orbital Enerji (E_{HOMO}), En Düşük Boş Moleküler Orbital Enerjisi (E_{LUMO}), Enerji aralığı (ΔE), elektronegatiflik (χ), kimyasal potansiyel (μ), kimyasal sertlik (η) ve yumuşaklık (S), iyonizasyon potansiyeli (I), elektron affinitesi (A), elektrofilik indeksi (ω) ve dipol moment gibi kuantum kimyasal tanımlayıcıları, B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanmış ve Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. POA'nın gaz fazında B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanmış kuantum kimyasal tanımlayıcıları.

Parametre	Değeri
E_{HOMO} (eV)	-6,732
E_{LUMO} (eV)	-0,402
ΔE (eV)	6,330
İyonizasyon potansiyeli (I) (eV)	6,732
Elektron affinitesi (A) (eV)	0,402
Kimyasal potansiyel (μ)	-3,567
Elektronegatiflik (χ) (eV)	3,567
Sertlik (η)	3,165
Yumuşaklık (S) (eV^{-1})	0,316
Dipol Moment (Debye)	1,820
Elektrofilik indeksi (ω)	2,010

Bileşiğin HOMO ve LUMO diyagramı Şekil 4' te gösterilmiştir. Buna göre, HOMO orbitallerinin elektron yoğunluğu molekülün çift bağı üzerinde yoğunlaşırken, LUMO orbitalinde elektron yoğunluğu karboksilik asit grubu üzerindedir.



Şekil 4. POA molekülünün moleküler orbital (HOMO ve LUMO) diyagramı ve ΔE enerji aralığı

POA molekülünün gaz fazında DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanan HOMO ve LUMO enerjisi sırasıyla -6,732 eV ve -0,402 eV' dir. Buna göre 6,330 eV değerinde yüksek olarak elde edilen HOMO-LUMO enerji aralığı, POA bileşiğinin yüksek kimyasal kararlılığa ve düşük reaktiviteye sahip olduğunu gösterir. Tablo 3' teki sonuçlara göre elektrofilik indeksinin ve kimyasal potansiyelin sırasıyla 2,010 ve -3,567 eV olarak

hesaplanan değeri, POA'nın kimyasal aktivitesini etkileyen molekül içindeki nihai yük transferi etkileşimini açıklar.

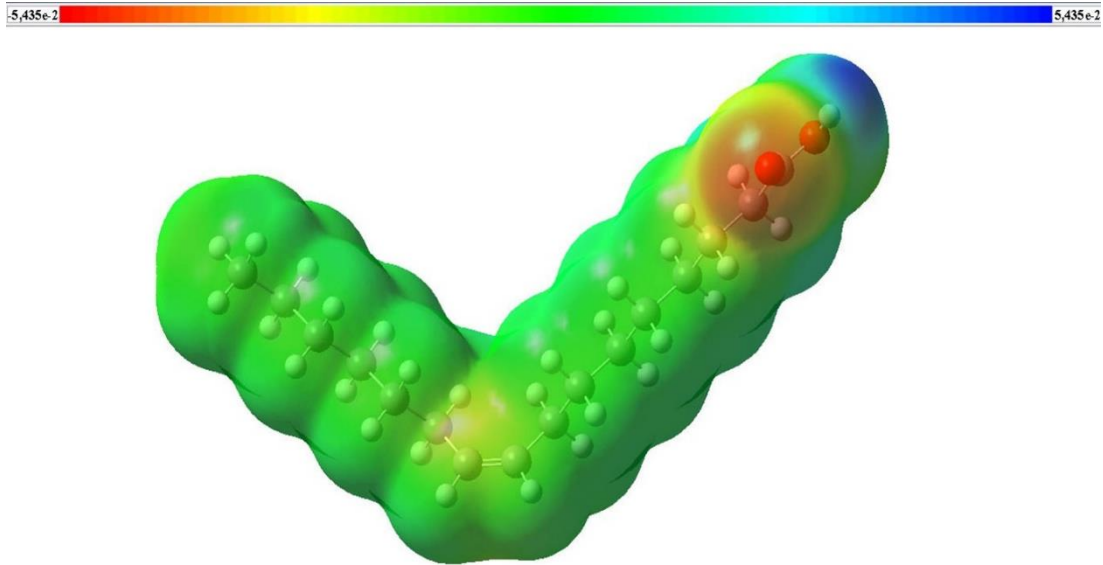
D. Moleküler Elektrostatik Potansiyel (MEP)

Moleküler elektrostatik potansiyel (MEP) analizi, biyomoleküller ve ilaçlar da dahil olmak üzere moleküler sistemlerin yük dağılımlarını üç boyutlu olarak gösteren ve kimyasal reaktiviteleri, hidrojen bağı etkileşimleri, elektrofilik ve nükleofilik bölgeleri tayin etmek için sıklıkla kullanılan yararlı bir yöntemdir[30].

MEP moleküler boyut, şekil ve pozitif, negatif, nötr elektrostatik potansiyel bölgeleri aynı anda göstermesi ve fizikokimyasal özellik-moleküler yapı ilişkisinin araştırılmasında oldukça önemlidir[31]. Elde edilen yüzey, moleküler boyut ve şekil ile aynı anda elektrostatik potansiyel değerini gösterir. Ayrıca MEP, molekülün dipol momenti, elektronegatifliği, kısmi yükleri ve kimyasal reaktivite bölgesi ile ilişkilidir. Bir molekülün relatif polaritesini anlamak için görsel bir yöntem sağlar.

Pozitif elektrostatik potansiyel, düşük elektron yoğunluğunun bulunduğu bölgelerde protonun atom çekirdeği tarafından itilmesine karşılık gelirken, negatif elektrostatik potansiyel molekülün konsantrasyon elektron yoğunluğu ile protonun çekilmesine karşılık gelir. MEP yüzeyindeki farklı elektrostatik potansiyel değerleri farklı renklerle temsil edilir: kırmızı, mavi ve yeşil en negatif, en pozitif ve sıfır elektrostatik potansiyeli olan bölgelerdir. Bu bölgelerin belirlenmesi, molekül içi ve moleküller arası etkileşim alanların belirlenmesi anlamına gelir.

Potansiyeldeki artışlar kırmızı < turuncu < sarı < yeşil < mavi sırasıyla tanımlanır. Elektrostatik potansiyelin değeri, bir substratın reseptör bağlanma bölgelerine bağlanmasından büyük ölçüde sorumludur, çünkü reseptör ve karşılık gelen ligandlar molekül yüzeylerinde birbirlerini tanırlar. Şekil 5, mevcut bileşik için B3LYP/6-311++G(d,p) yöntemi ile gaz fazında hesaplanan MEP yüzeyini göstermektedir. POA'nın MEP haritasının renk kodu -5,435 eV ve +5,435 eV arasında değişmektedir, burada mavi en güçlü çekiciliği ve kırmızı ise en güçlü iticiliği göstermektedir.



Şekil 5. POA için $\rho(r) = 0,0004$ au üzerinde eşlenen moleküler elektrostatik potansiyel, $-5,435e-2$ (kırmızı) ile $+5,435e-2$ (mavi) arasında değişen izodensite yüzeyi

Şekil 5 kimyasal olarak aktif bölgenin görsel bir temsili ve atomlardaki relatif reaktiviteyi sunmaktadır[32]. Elde edilen MEP yüzeyinden, negatif bölgenin esas olarak -COOH karboksil grubun oksijen

(C=O) atomunda lokalize olduğu açıkça görülebilir ki molekülün en reaktif kısmıdır. Karboksil grubunun (O-H) H atomunda lokalize bir maksimum pozitif bölge bulunur ve bu da olası bir nükleofilik atak bölgesini gösterir. Buna göre, H atomunun en güçlü çekimi ve O atomunun en güçlü itmeyi gösterdiğini söyleyebiliriz. Pozitif ve negatif bölgeler, bileşiğin moleküller arası etkileşimlere sahip olabileceği bölge hakkında bilgi verir. Bu sonuçlardan, bileşik bir protein yapısı ile kenetlendiğinde (docking), reaksiyon yolunun moleküldeki COOH grubu yoluyla olacağı anlaşılmaktadır.

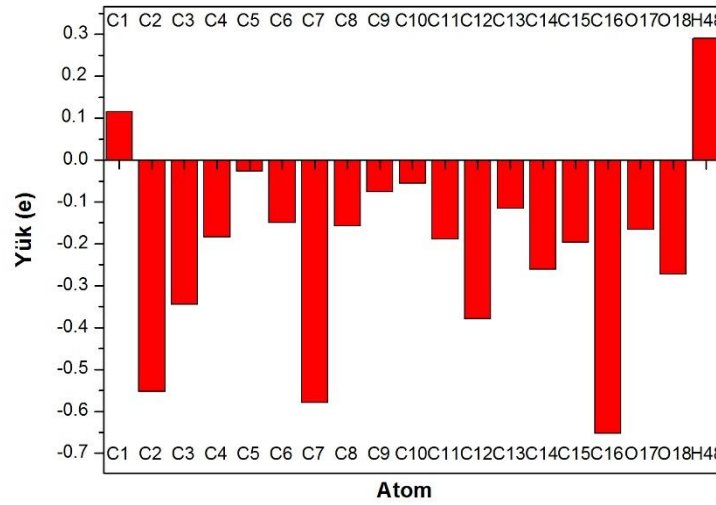
E. Mulliken Atomik Yükler

Atomik yükler moleküler sistemlerin dipol momentini, polarizasyonunu, elektronik yapısını, titreşim spektrumlarını ve daha birçok özelliği etkilediğinden, bu sistem için kuantum kimyasal hesaplamalarının uygulanmasında önemli bir rol oynar[33]. Mulliken yük analizi hidrojen bağlanma olasılıklarını açıklar. PAO' nın atomik yükleri, mulliken popülasyon analizi ile gaz fazında DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde her atomun elektron popülasyonu belirlenerek hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4' te sunulmuştur. POA' nın mulliken yüklerinin histogramı ise Şekil 6' da gösterilmiştir.

Tablo 4. POA' nın B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanmış Mulliken atomik yükleri

Atom numarası	Mulliken atomik yükler	Atom numarası	Mulliken atomik yükler	Atom numarası	Mulliken atomik yükler
C1	0,116	H19	0,111	H38	0,077
C2	-0,553	H20	0,124	H39	0,170
C3	-0,345	H21	0,127	H40	0,127
C4	-0,184	H22	0,130	H41	0,129
C5	-0,026	H23	0,125	H42	0,190
C6	-0,150	H24	0,126	H43	0,190
C7	-0,579	H25	0,126	H44	0,172
C8	-0,157	H26	0,127	H45	0,136
C9	-0,076	H27	0,156	H46	0,140
C10	-0,056	H28	0,132	H47	0,135
C11	-0,189	H29	0,163		
C12	-0,379	H30	0,163		
C13	-0,115	H31	0,120		
C14	-0,261	H32	0,112		
C15	-0,196	H33	0,132		
C16	-0,653	H34	0,112		
O18	-0,272	H35	0,122		
O17	-0,166	H36	0,120		
H48	0,291	H37	0,137		

Mulliken analizi ile elde edilen sonuçlara göre hidrokarbon zinciri boyunca tüm hidrojen atomları, 0,111-0,190e aralığında değişen pozitif yüklere sahip iken, karboksil gruba ait hidrojen atomu 0,291 ile maksimum pozitif yüke sahiptir. Zincir boyunca tüm karbon atomları negatif yüklere sahip iken, karboksil gruba ait karbon atomu C1 pozitif yüke sahiptir. Mulliken popülasyon analizi, O17 ve O18 gibi iki elektronegatif atomun varlığını gösterir ve bu atomlar karboksil gruba ait C1 (0,116e) ve H48 (0,291e) atomları üzerinde pozitif yük oluşturur. Karboksil gruptaki hidrojen ve karbon atomu iki oksijen atomunun daha elektronegatif olmasından dolayı, elektronlarını oksijen atomlarına kaybederler ve bu yüzden pozitifdir. Sonuç olarak, moleküler arası etkileşimde H48 atomu reseptörün negatif yüklü kısmı ile etkileşime girebilen, O18 atomu ise verici atomla etkileşime girebilen elektronegatif atomdur.



Şekil 6. POA' nın B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanmış Mulliken yük analizi histogramı

F. Termodinamik Özellikler

POA' nın enerjik, yapısal ve reaktivite özellikleri arasında tutarlı ilişkiler elde etmek için termodinamik özellikleri de belirlenmiştir. POA' nın sıfır noktası titreşim enerjisi (ZPE), termal enerjisi, spesifik ısı kapasitesi, dönme sabitleri, entropi ve dipol momentini gibi termodinamik parametreleri 298,15 K ve 1 atm basınçta gaz fazında B3LYP/6-311++G(d,p) yöntemi ile hesaplanmıştır. Titreşim analizi ve istatistiksel termodinamik temeline dayanılarak, POA' nın standart istatistiksel termodinamik fonksiyonları harmonik frekans hesaplarından elde edilmiş ve Tablo 5' te listelenmiştir.

Dipol moment (μ), moleküllerin elektriksel ve optik özelliklerini anlamak için önemli bir parametredir. Üç boyutlu bir vektör olan dipol moment moleküler yük dağılımı hakkında bilgi verir. Bu nedenle, molekül üzerindeki yük hareketini göstermek için tanımlayıcı olarak kullanılabilir. Bir moleküldeki dipol moment vektörü, pozitif ve negatif yüklerin merkezlerine bağlıdır. Dipol momentin değeri nötr moleküller için kesin olarak belirlenirken, yüklü sistemler için orijin seçimine ve moleküler yönelime bağlıdır. Ayrıca dipol moment ne kadar büyük olursa moleküller arası etkileşimler o kadar güçlü olur[34].

Tablo 5. POA' nın B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanmış sıfır nokta titreşim enerjisi, dönme sabitleri, rotasyonel sıcaklığı, termal enerji, sabit hacimde molar kapasite, entropi ve dipol momentini

Parametreler	Değeri	
ZPE (kcal mol ⁻¹)	273,02293	
Dönme sabitleri (GHz)	0,49546	
	0,07120	
	0,06389	
Dönme sıcaklığı (K)	0,02378	
	0,00342	
	0,00307	
Termal Enerji (kcal mol ⁻¹)		
	Toplam	287,364
	Öteleme	0,889
	Dönme	0,889
Titreşim	285,586	

Tablo 5. (devam ediyor.)

Parametreler	Değeri
Sabit hacimde molar kapasite (cal mol ⁻¹ K ⁻¹)	
Toplam	80,841
Öteleme	2,981
Dönme	2,981
Titreşim	74,879
Entropi (cal mol ⁻¹ K ⁻¹)	
Toplam	173,078
Öteleme	42,499
Dönme	36,210
Titreşim	94,369
Dipol moment (Debye)	
μ _x	-0,2917
μ _y	-0,1145
μ _z	-1,6759
μ _{toplam}	1,7049

Ayrıca bileşiğin termodinamik özellikleri (ısı kapasitesi, entropi ve entalpi) farklı sıcaklıklarda da hesaplanmıştır. Burada tüm termodinamik hesaplar gaz fazında yapılmıştır.

Tablo 6. POA' nın 100 ile 1000 K aralığında B3LYP/6-311++G(d,p) metodu ile hesaplanan termodinamik parametreleri

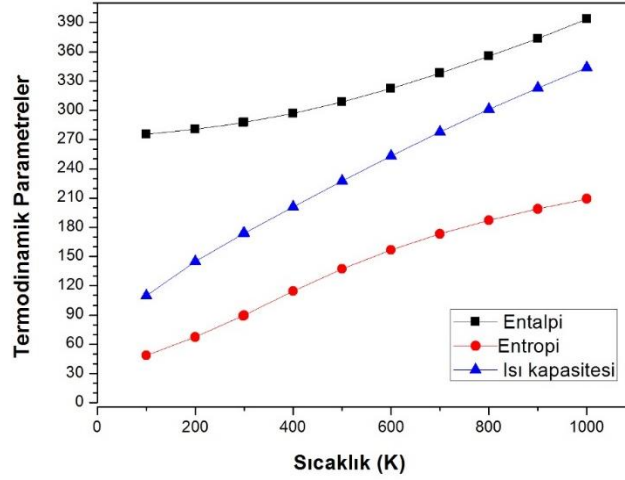
T (K)	C _{p,m} ^o (Cal mol ⁻¹ K ⁻¹)	S _m ^o (Cal mol ⁻¹ K ⁻¹)	H _m ^o (kCal mol ⁻¹)
100	48,544	109,852	275,592
200	67,170	144,844	280,547
298,15	89,155	173,078	287,364
300	89,607	173,592	287,514
400	114,368	200,948	296,884
500	137,172	227,564	308,655
600	156,660	253,193	322,543
700	173,080	277,636	338,222
800	186,990	300,836	355,413
900	198,865	322,891	373,889
1000	209,059	343,646	393,467

Tablo 6' dan görüldüğü gibi, termodinamik fonksiyonlar 100 ila 1000 K arasında artan sıcaklıkla artmıştır, çünkü sıcaklığı arttırmak moleküler titreşimin yoğunluğunda bir artışa neden olmaktadır [35]. Bu termodinamik fonksiyonlar ile sıcaklık arasındaki korelasyon grafiği Şekil 7' de gösterilmektedir ve korelasyon denklemleri aşağıda verilmektedir:

$$C_{p,m}^o(T) = 16,13861 + 0,28304T - 8,83428 \times 10^{-5}T^2 \quad , \quad R^2 = 0,99709$$

$$S_m^o(T) = 79,52607 + 0,33084T - 6,72727 \times 10^{-5}T^2 \quad , \quad R^2 = 0,99977$$

$$H_m^o(T) = 270,96293 + 0,02853T + 9,49664 \times 10^{-5}T^2 \quad , \quad R^2 = 0,99967$$



Şekil 7. POA molekülünün farklı sıcaklıklardaki termodinamik özelliklerinin korelasyon grafikleri

Isı kapasitesi, entropi ve entalpi gibi termodinamik özellikler ile sıcaklıklar arasındaki korelasyon denklemleri, kuadratik formüller ile fit edilmiş ve ilgili regresyon faktörleri (R^2) sırasıyla 0,99709, 0,99977 ve 0,99967 elde edilmiştir.

Yukarıda adı geçen termodinamik parametreler, POA hakkında gelecekte yapılacak çalışmalar için yararlı bilgiler sağlayabilir. Örneğin, POA ile başka bir bileşik arasındaki etkileşimi araştırdığımızda, bu denklemlerden termodinamik özellikler elde edilebilir ve daha sonra reaksiyonun kendiliğindenliğini değerlendirmemizde yardımcı olacak reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişimi hesaplamak için kullanılabilir. Ayrıca bu denklemler diğer termodinamik fonksiyonları hesaplamak ve termodinamiğin ikinci yasasına göre kimyasal reaksiyonların yönünü tahmin etmek için de kullanılabilirler.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada pek çok biyolojik süreçte önemli rol oynayan cis-POA'nın yapısal, titreşimsel ve elektronik özellikleri kuantum kimyasal yöntemler kullanılarak ilk kez karakterize edilmiş ve tartışılmıştır. Molekülün geometrik parametreleri, harmonik titreşim frekansları, moleküler orbital (HOMO-LUMO) enerjileri ve bu enerji değerleri ile ilişkili diğer özellikleri DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde hesaplanmıştır. Geometrik parametrelerin deneysel ve teorik sonuçları arasında çizilen korelasyon grafiklerinden elde edilen korelasyon katsayıları bu sonuçların uyum içinde olduğunu göstermektedir. POA'nın hesaplanan ve literatürden elde edilen deneysel FT-IR spektrumundaki temel titreşim modları karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. POA'nın hesaplanan infrared spektrumunda O-H gerilme titreşim moduna ait band gözlenirken, sıvı haldeki POA'nın deneysel ATR-FTIR spektrumunda bu spektral bölgede bandın gözlenmemesi ve spektrumdaki en güçlü mod olan $\nu(C=O)$ gerilme modunun deneysel spektrumda teorik spektrumda hesaplanan değere göre daha düşük dalga boyunda gözlenmesi molekülün sıvı formda dimer yapıda olduğunu göstermektedir. POA'nın hesaplanan Mulliken atomik yükleri, karboksil grubun oksijen atomunun elektron alıcısı, hidrojen atomunun vericisi olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlardan, moleküler arası etkileşimde reaksiyon yolunun moleküldeki COOH grubu yoluyla olacağı açıkça görülmektedir. POA'nın birçok aktif moleküle göre yüksek HOMO-LUMO enerji aralığına, yüksek sertlik ve düşük yumuşaklık parametresine sahip olması düşük kimyasal aktivite ve yüksek kinetik stabilite ile kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. MEP haritasındaki sonuçlar, negatif potansiyel bölgesinin karboksil grubun oksijen atomları etrafında olduğunu, nükleofilik reaksiyonları tanımlayan maksimum pozitif bölgenin ise karboksil grubun hidrojen atomu etrafında olduğunu göstermiş ve bileşiğin kovalent olmayan etkileşimlere sahip olabileceği bölgeler hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamıştır. Isı kapasitesi, entropi, entalpi ve sıcaklık arasında, diğer termodinamik fonksiyonları hesaplamak ve oluşabilecek kimyasal reaksiyonların yönünü tahmin etmek için de kullanılacak korelasyon denklemleri elde edilmiş ve tüm termodinamik parametrelerin, artan sıcaklıkla birlikte arttığı bulunmuştur. Yaptığımız bu teorik

çalışmamolekülün geometrikve elektronik yapısına bağlı değişen biyolojik aktivitesini anlamak için önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Gennis, R.B. (1989). *Biomembranes: Molecular Structure and Function* Springer-Verlag, New York,,533.
- [2] Small, D.M. (1986). *The physical chemistry of lipids : from alkanes to phospholipids*1th ed. Springer, London, 692.
- [3] Jakobsen, M.U., Overvad, K., Dyerberg, J., Schroll, M., & Heitmann, B.L. (2004). Dietary fat and risk of coronary heart disease: Possible effect modification by gender and age. *American Journal of Epidemiology*, 160, 141–149.
- [4] Yamamoto, Y., Kawamura, Y., Yamazaki, Y., Kijima, T., Morikawa, T., & Nonomura, Y. (2015). Palmitoleic Acid Calcium Salt: A Lubricant and Bactericidal Powder from Natural Lipids. *Journal of Oleo Science*, 64, 283–288.
- [5] Yoon, W.-J., Kim, M.-J., Moon, J.-Y., Kang, H.-J., Kim, G.-O., & Lee, N.H. (2010). Effect of Palmitoleic Acid on Melanogenic Protein Expression in Murine B16 Melanoma. *Journal of Oleo Science*, 59, 315–319.
- [6] Fischer, C.L., Drake, D.R., Dawson, D. V., Blanchette, D.R., Brogden, K.A., & Wertz, P.W. (2012). Antibacterial Activity of Sphingoid Bases and Fatty Acids against Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 56, 1157–1161.
- [7] Wille, J.J. & Kydonieus, A. (2003). Palmitoleic Acid Isomer (C16:1Δ6) in Human Skin Sebum Is Effective against Gram-Positive Bacteria. *Skin Pharmacology and Physiology*, 16, 176–187.
- [8] Çimen, I., Kocatürk, B., Koyuncu, S., Tufanlı, Ö., Onat, U.I., Yıldırım, A.D., et al. (2016). Prevention of atherosclerosis by bioactive palmitoleate through suppression of organelle stress and inflammasome activation. *Science Translational Medicine*, 8, 358ra126.
- [9] Cimen, I., Yildirim, Z., Dogan, A.E., Yildirim, A.D., Tufanlı, O., Onat, U.I., et al. (2019). Double bond configuration of palmitoleate is critical for atheroprotection. *Molecular Metabolism*, 28, 58–72.
- [10] Kaneko, F., Yano, J., & Sato, K. (1998). Diversity in the fatty-acid conformation and chain packing of cis-unsaturated lipids. *Current Opinion in Structural Biology*, 8, 417–425.
- [11] Kaneko, F., Yamazaki, K., Kobayashi, M., Sato, K., & Suzuki, M. (1994). Vibrational spectroscopic study on polymorphism of erucic acid and palmitoleic acid: $\gamma_1 \rightarrow \alpha_1$ and $\gamma \rightarrow \alpha$ reversible solid state phase transitions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, 50, 1589–1603.
- [12] Frisch, M.J., Trucks, G.W., Schlegel, H.B., Scuseria, G.E., Robb, M.A., Cheeseman, J.R., Scalmani, G., Barone, V., Mennucci, B., Petersson, G.A., Nakatsuji, H., Caricato, M., Li, X., Hratchian, H.P., Izmaylov, A.F., Bloino, J., Zheng, G., Sonnenberg, J.L., Hada, M., Ehara, M., Toyota, K., Fukuda, R., Hasegawa, J., Ishida, M., Nakajima, T., Honda, Y., Kitao, O., Nakai, H., Vreven, T., Montgomery, J.A., Peralta Jr, J.E., Ogliaro, F., Bearpark, M., Heyd, J.J., Brothers, E., Kudin, K.N., Staroverov, V.N., Kobayashi, R., Normand, J., Raghavachari, K., Rendell, A., Burant, J.C., Iyengar, S.S., Tomasi, J., Cossi, M., Rega, N., Millam, J.M., Klene, M., Knox, J.E., Cross, J.B., Bakken, V., Adamo, C., Jaramillo, J., Gomperts, R., Stratmann, R.E., Yazyev, O., Austin, A.J., Cammi, R., Pomelli, C., Ochterski, J.W., Martin, R.L., Morokuma, K., Zakrzewski, V.G., Voth, G.A., Salvador, P., Dannenberg, J.J., Dapprich, S., Daniels, A.D., Farkas, O., Foresman, J.B., Ortiz, J.V., Cioslowski, J., Fox, D.J., Gaussian 09, Revision A.0.2, Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2009.
- [13] Sundaraganesan, N., Ilakiamani, S., Saleem, H., Wojciechowski, P.M., & Michalska, D. (2005). FT-Raman and FT-IR spectra, vibrational assignments and density functional studies of 5-bromo-2-nitropyridine. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 61, 2995–3001.

- [14] Jamróz M H (2010) Vibrational Energy Distribution Analysis VEDA 4, Warsaw.
- [15] Dennington, R., Keith, T.A., & Millam, J.M. (2008). Gaussview 5.0.8, Gaussian Inc., Wallingford, CT.
- [16] Abrahamsson, S. & Ryderstedt-Nahringbauer, I. (1962). The crystal structure of the low-melting form of oleic acid. *Acta Crystallographica*, 15, 1261–1268.
- [17] Kaneko, F., Yamazaki, K., Kobayashi, M., Kitagawa, Y., Matsuura, Y., Sato, K., et al. (1993). Structure of the γ phase of erucic acid. *Acta Crystallographica Section C Crystal Structure Communications*, 49, 1232–1234.
- [18] Copyright © 2012-2018 Bio-Rad Laboratories, Inc. All Rights Reserved.
<https://spectrabase.com/spectrum/8R37FJII3H>
- [19] Machado, N.F.L., De Carvalho, L.A.E.B., Otero, J.C., & Marques, M.P.M. (2012). The autooxidation process in linoleic acid screened by Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, 43, 1991–2000.
- [20] Gocen, T., Haman Bayarı, S., & Guven, M. H. (2017). Linoleic acid and its potassium and sodium salts: A combined experimental and theoretical study. *Journal of Molecular Structure*, 1150, 68–81.
- [21] Lewandowski, W., Kalinowska, M., & Lewandowska, H. (2005). The influence of halogens on the electronic system of biologically important ligands: Spectroscopic study of halogenobenzoic acids, halogenbenzoates and 5-halogenouracils. *Inorganica Chimica Acta*, 358, 2155–2166.
- [22] Silverstein, R.M., Bassler, G.C. & Morrill, T.C. (1976). Spectrometric identification of organic compounds, 3rd edition. *Journal of Molecular Structure*, 30, 424–425.
- [23] Lewis, D.F. V., Ioannides, C., & Parke, D. V. (1994). Interaction of a series of nitriles with the alcohol-inducible isoform of P450: Computer analysis of structure—activity relationships. *Xenobiotica*, 24, 401–408.
- [24] Pearson, R.G. (1988). Electronic spectra and chemical reactivity. *Journal of the American Chemical Society*, 110, 2092–2097.
- [25] Zhan, C.-G., Nichols, J.A., & Dixon, D.A. (2003). Ionization Potential, Electron Affinity, Electronegativity, Hardness, and Electron Excitation Energy: Molecular Properties from Density Functional Theory Orbital Energies. *The Journal of Physical Chemistry A*, 107, 4184–4195.
- [26] Sheela, N.R., Muthu, S., & Sampathkrishnan, S. (2014). Molecular orbital studies (hardness, chemical potential and electrophilicity), vibrational investigation and theoretical NBO analysis of 4-4'-(1H-1,2,4-triazol-1-yl methylene) dibenzonitrile based on abinitio and DFT methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 120, 237–251.
- [27] Koopmans, T. (1934). Über die Zuordnung von Wellenfunktionen und Eigenwerten zu den Einzelnen Elektronen Eines Atoms. *Physica*, 1, 104–113.
- [28] Parr, R.G., Szentpály, L. V., & Liu, S. (1999). Electrophilicity Index. *Journal of the American Chemical Society*, 121, 1922–1924.
- [29] Eşme, A. & Sağdıç, S.G. (2017). Spectroscopic (FT–IR, FT–Raman, UV–Vis) analysis, conformational, HOMO-LUMO, NBO and NLO calculations on monomeric and dimeric structures of 4-pyridazinecarboxylic acid by HF and DFT methods. *Journal of Molecular Structure*, 1147, 322–334.
- [30] Chidangil, S. & Mishra, P.C. (1997). Structure-Activity Relationship for Some 2',3'-Dideoxynucleoside Anti-HIV Drugs Using Molecular Electrostatic Potential Mapping. *Journal of Molecular Modeling*, 3, 172–181.
- [31] Mishra, P.C. , Kumar, A., Murray, J.S., & Sen, K.D. (1996). *Theoretical and Computational Chemistry*

Book Series. in: Mol. Electrostat. Potentials Concepts Appl. Elsevier, Amsterdam, 257.

- [32] Gupta, V.P., Sharma, A., Virdi, A., & Ram, V. (2006). Structural and spectroscopic studies on some chloropyrimidine derivatives by experimental and quantum chemical methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 64, 57–67.
- [33] Mulliken, R.S. (1955). Electronic Population Analysis on LCAO–MO Molecular Wave Functions. I. *The Journal of Chemical Physics*, 23, 1833–1840.
- [34] Karthikeyan, N., Joseph Prince, J., Ramalingam, S., & Periandy, S. (2014). Vibrational spectroscopic [FT-IR, FT-Raman] investigation on (2,4,5-Trichlorophenoxy) Acetic acid using computational [HF and DFT] analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 124, 165–177.
- [35] Bopp, F., Meixner, J., & Kestin, J. (1967). *Thermodynamics and Statistical Mechanics* Academic Press Inc., New York, 420.

Araştırma Makalesi - Research Article

Geleneksel Donatılmış Betonarme Bağ Kirişlerin Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması

Rohullah Jamal^{1*}, S. Bahadır Yüksel²

Geliş / Received: 30/04/2020

Revize / Revised: 22/09/2020

Kabul / Accepted: 01/10/2020

ÖZ

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY, 2018)'de geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişleri için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin çekme ve basınç donatısı oranı, enine donatı çapı ve aralığı sabit tutulmuş net açıklık / derinlik oranı ve beton basınç dayanımını değiştirilerek SAP 2000 programı ile moment-eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada; gerçek malzeme davranışları esas alınmıştır. Elde edilen momenti-eğrilik ilişkilerinden betonarme bağ kirişlerinin elastik ötesi davranışları incelenmiştir. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişi modelleri için moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen veriler kullanılarak TBDY, (2018)'de verilen hasar sınır değerleri betonarme bağ kiriş modelleri için hesaplanmıştır. Şekil değiştirme değerleri TBDY (2018)'de tanımlanmış olan göçmenin önlenmesi (GÖ), kontrollü hasar (KH) ve sınırlı hasar (SH) performans seviyeleri için hesaplanmıştır. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişleri için üç ayrı hasar sınırı ve bu hasar sınırlarına karşı gelen birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerde farklı performans düzeyi için beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri ve plastik dönmeleri hesaplanarak performans düzeyleri araştırılmıştır. GÖ ve KH performans düzeyleri için plastik dönmelerin hasar sınırları; akma eğriliği, kopma eğriliği, plastik mafsal uzunluğu, kesme açıklığı ve boyuna donatı çapının fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada; geleneksel donatılmış bağ kirişlerinin beton basınç dayanımının akma momentine (M_y), GÖ ve KH performans düzeyleri için plastik dönme sınırlarına ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) etkili olduğu gözlemlenmiştir. Net açıklık derinlik oranının (l_n/h) artırılması; geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin GÖ ve KH performans düzeyleri için izin verilen plastik dönme sınırlarına ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) ve akma durumu için yer değiştirmiş eksen dönmesi üzerine (θ_y) etkili olduğunu ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Moment-Eğrilik, Performans Düzeyleri, Hasar Sınırları, Birim Şekil Değiştirme Sınırları, Plastik Dönme

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: jamal.rohullah@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-5987-8502>)

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

²İletişim: sbyuksel@ktun.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4175-1156>)

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Investigation of Damage Limits of Conventional Reinforced Concrete Coupling Beams

ABSTRACT

Deformation based damage limits of conventional reinforced concrete coupling beams were analytically investigated considering the Turkish Seismic Building Code 2018 (TSC, 2018). Moment-curvature values of the conventional reinforced concrete beams were calculated with the SAP 2000 programs by taking constant tension and compression reinforcement ratios, transverse reinforcement diameter and spacing's and changing the net span/depth ratio and concrete compressive strengths. In this study, real material behaviour was taken into account. Inelastic behaviors of reinforced concrete coupling beams are investigated from the moment-curvature relations. The damage limit values given in TSC (2018) were calculated for reinforced concrete coupling beam models using the data obtained from moment-curvature relationships of conventionally reinforced concrete coupling beams models. Strain values are calculated for the collapse prevention (CP), controlled damage (CD) and limited damage (LD) performance levels defined in TSC (2018). Three different damage limits and unit strain values corresponding to these damage limits were examined for conventionally reinforced concrete coupling beams. The performance levels of the concrete and reinforcement steel deformations and plastic rotations were calculated for different performance levels of conventional reinforced concrete coupling beams. Damage limits of plastic rotations of the CP and CD performance levels are defined as functions of yield curvature, maximum curvature, plastic hinge length, shear length, and longitudinal reinforcement diameter. In this study; it has been observed that the concrete compressive strength affect the yield moment (M_y), plastic rotation limits ($\theta_p^{(CD)}$ and $\theta_p^{(CP)}$) for performance levels of CP and CD of conventional reinforced coupling beams. It is proven that the net span depth to ratio (l_n/h) effect the; plastic rotation limits ($\theta_p^{(CD)}$ and $\theta_p^{(CP)}$) of the CP and CD performance levels and yield chord rotation (θ_y) for the conventional reinforced concrete coupling beams.

Keywords- *Moment-Curvature, Performance Levels, Damage Limits, Strain Limits, Plastic Rotation*

I. GİRİŞ

Yapı taşıyıcı sisteminin doğrusal sınır ötesindeki kapasitesinin de dikkate alındığı hesap yöntemleri son yıllarda yaygınlaşmıştır. Yapının dayanım ve yer değiştirme kapasitelerini ortaya çıkaran, göçme aşamasına kadar oluşacak hasarların adım adım izlenebildiği doğrusal olmayan hesap yöntemleri kullanılarak, yapı davranışı daha iyi anlaşılabilir. Performans esaslı değerlendirme yönteminin en önemli aşamalarından birisi yapısal elemanların her birinin hasar düzeylerinin belirlenmesidir. Yapı performansı, amaçlanan deprem istemi etkisinde yapıda oluşması beklenen hasar durumu ile ilişkilidir. Doğrusal olmayan değerlendirme yöntemi ile analiz edilen yapılardaki yapısal elemanların kesitlerinde oluşan şekil değiştirme değerlerinin, yürürlükte olan yönetmelikteki kesit hasar seviyesine tekabül eden şekil değiştirme üst sınır değerleri ile kıyaslanması ile kesitin hasar seviyesi elde edilir. Dolayısı ile yapıların deprem güvenliğini belirlemede kesit hasar sınır değerlerinin doğru bir şekilde elde edilmesi oldukça önem arz etmektedir. [1, 2].

Bağ kirişleri genellikle orta ve yüksek binalarda, merdivenlerin ve asansörlerin çevresinde bulunan perde duvarların bağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Bağ kirişlerinin deformasyon yapabilmesi elemanın kesme deformasyonu yapabilme kapasitesine bağlıdır. Bağ kirişleri iki perde duvarı birleştirerek kesme etkisinin perde duvarlara aktarılmasını sağlayarak, perde duvarların eğilme rijitliğinin artmasına sebep olmaktadır. Buna ilaveten bağ kirişleri, aşırı plastik deformasyonlara maruz kalarak sismik enerjisinin yutulmasını sağlarlar. Bağ kirişlerinin tasarımında amaç, bağ kirişlerinin sünek davranmasını, sismik yükler etkisi altında fazla dönme yapabilmesini ve daha fazla enerji tüketilmesini sağlayabilmektir [3]. Bağ kirişli betonarme perde duvarlar, orta ve yüksek katlı binalarda kullanılmaktadır. Bu tip taşıyıcı sistemler günümüzdeki yaygın olarak kullanılan sistemlerden biridir [4]. Boşluklu perde duvarlı taşıyıcı sistemlerde, sismik kuvvetler, perde duvarları ve bağ kirişleri tarafından bir çerçeve sistemi gibi karşılanmaktadır. Bu nedenle bağ kirişleri ve perde duvarları uygun bir şekilde tasarlanması gerekmektedir [5].

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'de sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlanmaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir [6].

Bu çalışmada; C30 ve C45 beton sınıfı, farklı çekme ve basınç donatısı oranlarına ve farklı net açıklık/derinlik oranına sahip geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin moment-eğrilik ilişkisi değerleri SAP 2000 [7] programı ile hesaplanmıştır. TBDY 2018'e göre KH performans düzeyi GÖ performans seviyesinin %75'i olarak tanımlanmıştır. SH performans düzeyinde ise beton ve donatı çeliği için izin verilen birim kısalma ve uzaması sabit olarak verilmiştir. SH performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsall oluşumuna izin verilmemiştir ($\theta_p^{(SH)} = 0$). Elde edilen moment ve eğrilik değerlerinden yararlanarak TBDY (2018)'e göre kesit hasar sınırları hesaplanmıştır. Bunun için 6 tip toplam 30 adet geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişi tasarlanmıştır. Tip-1, 2 ve 3 olan betonarme bağ kirişlerde C30, Tip 4, 5 ve 6 olan betonarme bağ kirişlerde C45 beton sınıfları ve B420C donatı sınıfı kullanılmıştır. Tip-1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olan geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerde değişen parametreler; beton sınıfı, çekme ve basınç donatı oranı ve net açıklık/derinlik oranıdır. Tüm elemanlarda 10mm çapında 50mm aralığında ($\Phi 10/50$ mm) etriyeler ele alınarak hasar sınırları TBDY 2018'e göre hesaplanmıştır. Çalışmada değişen parametrelerin hasar sınırlarına etkisi araştırılmıştır. TBDY 2018'e göre, GÖ performans hasar sınırları izin verilen beton birim kısalmaları ($\epsilon_c^{(GÖ)}$), donatı çeliği için izin verilen birim uzamaları ($\epsilon_s^{(GÖ)}$) ve izin verilen performans dönme açıları ($\theta_p^{(GÖ)}$) hesaplanmıştır [6].

II. TBDY 2018'E GÖRE İZİN VERİLEN ŞEKİL DEĞİŞTİRME HASAR SINIRLARI

Göçme önlenmesi, kontrolü hasar ve sınırlı hasar performans düzeyi için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yüksek binalar ve yeni betonarme bina elemanlarında yayılı plastik davranış modeline göre hesaplanan beton ve donatı çeliği toplam birim şekil değiştirmeleri için izin verilen hasar sınırları aşağıda tanımlanmıştır. GÖ, KH ve SH performans düzeyi için beton birim kısalması

$(\varepsilon_c^{(GÖ)}, \varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(SH)})$, donatı çeliği birim uzaması $(\varepsilon_s^{(GÖ)}, \varepsilon_s^{(KH)}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)})$ ve izin verilen plastik dönme sınırları $(\theta_p^{(GÖ)}, \theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(SH)})$ dikdörtgen en-kesitli kolon, kiriş ve perdeler için Tablo (1)'de verilen denklemler ile hesaplanmaktadır.

Tablo 1. Betonarme elemanları için izin verilen şekil değiştirme üst sınırların denklemleri [6]

Betonarme Elemanları İçin İzin Verilen Şekil Değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	
Göçme Öncesi Hasar (GÖ)	
$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018, \varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.40\varepsilon_{su}, \theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3}[(k_u - k_y)L_p(1 - 0.5\frac{L_p}{L_s}) + 4.5k_u d_b]$	
$\omega_{we} = \alpha_{se}\rho_{sh,min}\frac{f_{ywe}}{f_{ce}}, \rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s}, \alpha_{se} = (1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o})(1 - \frac{s}{2b_o})(1 - \frac{s}{2h_o})$	
Kontrollü Hasar (KH)	
$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75\varepsilon_c^{(GÖ)}, \varepsilon_s^{(KH)} = 0.75\varepsilon_s^{(GÖ)}$ ve $\theta_p^{(KH)} = 0.75\theta_p^{(GÖ)}$	
Sınırlı Hasar (SH),	
$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025, \varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$ ve $\theta_p^{(SH)} = 0$	

Tablo 1'de verilen $\varepsilon_c^{(GÖ)}, \varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(SH)}$ sırasıyla GÖ, KH ve SH performans düzeyi için izin verilen beton birim şekildeğiştirilmesidir. $\varepsilon_s^{(GÖ)}, \varepsilon_s^{(KH)}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)}$ sırasıyla GÖ, KH ve SH performans düzeyi için izin verilen donatı birim şekildeğiştirilmesini göstermektedir. $\theta_p^{(GÖ)}, \theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(SH)}$ sırasıyla göçmenin önlenmesi, kontrollü hasar ve sınırlı hasar performans düzeyi için izin verilen dönme açılarıdır. Tablo (1)'de verilen denklemlerde ω_{we} etkin sargı donatısının mekanik donatı oranını, ε_{su} donatının çekme dayanımına karşı gelen birim uzamasını, k_u maksimum eğriliğini, k_y akma eğriliğini, L_p plastik mafsallık uzunluğunu, L_s kesme açıklığını ve d_b boyuna donatı çapını göstermektedir. Hesaplarda yönetmeliğe göre boyuna donatı çapı çekme donatısının ortalama çapı olarak tanımlanmaktadır.

GÖ performans düzeyi için izin verilen beton birim kısalması ($\varepsilon_c^{(GÖ)}$) denklemindeki ilk terim (0.0035) sargısız betonun birim kısalmasına karşı gelmektedir. Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı (ω_{we}), sargı donatısı etkinlik katsayısı (α_{se}) ve kesitte hacimsel enine donatı oranı (ρ_{sh}) Tablo (1)'de verilen denklemler ile hesaplanmıştır. Tablo (1)'de, $\alpha_{se}, \rho_{sh,min}, f_{ywe}, A_{sh}$ ve ρ_{sh} sırasıyla sargı donatısının etkinlik katsayısını, dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranının küçük olanını, enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımını, göz önüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını göstermektedir. Denklemlerde b_k dik doğrultudaki çekirdek boyutunu (en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık), s enine donatı aralığını, b_o ve h_o sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını, a_i bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki mesafesini göstermektedir. Sınırlı hasar performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsallık oluşumuna izin verilmeyecektir ($\theta_p^{(SH)} = 0$).

Akma durumu için yer değiştirmiş plastik mafsallık eksen dönmesi θ_y Denklem (1) ile hesaplanmaktadır. Denklem (1)'de f_{ce} ve f_{ye} betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımı ile donatının ortalama akma dayanımıdır. η katsayısı kiriş ve kolonlarda $\eta = 1$, perdelerde ise $\eta = 0.5$ 'dir. TBDY (2018)'de betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımı ve donatının ortalama akma dayanımı $f_{ce} = 1.3f_{ck}$ ve $f_{ye} = 1.2f_{yk}$ olarak verilmiştir. f_{ck} ve f_{yk} sırasıyla beton karakteristik basınç dayanımı ve donatı çeliği karakteristik akma dayanımıdır.

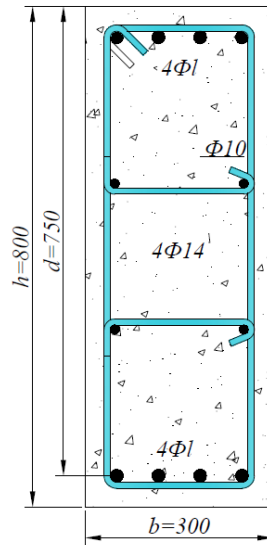
$$\theta_y = \frac{k_y L_s}{3} + 0.0015\eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{k_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}} \quad (1)$$

Bu çalışmada geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin deprem performansının belirlenmesi için TBDY, (2018)'de verilen kurallara göre sabit geometriye ve farklı parametrelere sahip 6 tip toplam 30 adet bağ

kiriş modeli tasarlanmıştır (Çizelge 3 ve 4). Tasarlanan geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerde gerçek malzeme davranışları esas alınmıştır. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerde farklı beton basınç dayanımı, çekme ve basınç donatısı oranı ve net açıklık/derinlik oranına göre moment-eğrilik ilişkilerinden; akma eğriliği (k_y), akma momenti (M_y), göçme öncesi eğriliği (k_u), göçme öncesi eğilme momenti (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) değerleri elde edilmiştir. Betonarme kiriş modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen sonuçlara göre kiriş kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kiriş modellerinde yapılan performans değerlendirmesinde GÖ, KH ve SH performans seviyeleri için şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanmıştır. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kiriş elemanlarında sargı donatısı oranı sabit tutularak, farklı parametre olarak net açıklık/derinlik oranı, çekme ve basınç donatısı oranı ve beton basınç dayanımı ele alınmıştır. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri, plastik mafsal akma dönmesi ve plastik dönmeleri hesaplanarak bağ kiriş kesitlerinin performans düzeyleri araştırılmıştır. Çalışmada çekme ve basınç donatısı miktarı (4Φ20, 4Φ26 ve 4Φ32) değiştirilerek enine donatı çapı ve aralığı Φ10/50mm olarak sabit alınmıştır. Net açıklık-derinlik oranı ($l_n/h = 2, 2.5, 3, 3.5$ ve 4) ve beton sınıfı C30 ve C45 değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır.

Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerde süneklik oranı, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Eğilme etkisi altındaki elemanların sünekliği, eğrilik süneklik katsayısı (μ) Denklem (2) ile hesaplanmaktadır. Eğrilik süneklik katsayısı, kesitin kırılma anında yaptığı eğriliğin (k_u), çekme donatısının aktığı anda kesitte oluşan eğriliğe (k_y) oranıdır [8].

$$\mu = \frac{k_u}{k_y} \quad (2)$$



Şekil 1. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin en-kesit boyutları ve donatı düzeni

III. MATERYAL VE METOT

Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişi modellerinde moment-eğrilik analizlerinden M_y , $k_y M_u$, k_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Moment ve eğrilik değerleri SAP 2000 fiber analiz modellerinden elde edilmiştir. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin hasar sınırları TBDY 2018'e göre hesaplanmıştır. Şekil değiştirme ve iç kuvvet sınırlarının hesaplanmasında TBDY, (2018)'de tanımlanmış üç farklı hasar sınırı olan GÖ, KH ve SH performans seviyeleri göz önünde bulundurulmuştur. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinde farklı performans seviyesi için oluşan şekil değiştirme ve iç kuvvet sınırları hesaplanarak Çizelgeler

ve Grafikler halinde sunulmuştur. Birim şekil değiştirme istemlerinin belirlenmesi plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanlarında, farklı kesit hasar sınırlarında GÖ, KH ve SH performans düzeyleri için izin verilen beton ve donatı çeliği şekil değiştirme üst sınırları hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen k_y ve k_u değerlerine göre plastik mafsal dönmeleri hesaplanmıştır. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerde çekme ve basınç donatısı miktarı $4\Phi 20\text{mm}$, $4\Phi 26\text{mm}$ ve $4\Phi 32\text{mm}$, enine donatı çapı $\Phi 10\text{mm}$ ve aralığı 50mm ($\Phi 10/50\text{mm}$) olarak belirlenerek beton sınıfı C30 ve C45 olarak seçilmiştir. Tüm elemanlarda boyuna ve enine donatı çeliği olarak B420C donatı sınıfı seçilmiştir. Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin tasarımında kullanılan malzeme özellikleri Tablo (2)'de, verilmiştir. Bağ kirişlerinin çekme ve basınç donatısı oranları ve modellerinde kullanılan parametreler sırasıyla Tablo (3) ve (4)'te verilmiştir.

Tablo 2. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C30,45	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değeri (ϵ_{co})	0.002
	Sargısız betonun nihai birim şekil değiştirmesi (ϵ_{cu})	0.0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	30,45MPa
Donatı Çeliği: B420C	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sp})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{su})	0.08
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

Tablo 3. Tip-1, 2 ve 3 olarak tasarlanan bağ kiriş modellerine ait donatı oranları ve alanları

Kesit Grubu	Kesit No	l_n/h	Beton Sınıfı	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	$\rho = \rho'$
Tip-1	B1-1	2.0	30	4 Φ 20 1256.6	4 Φ 20 1256.6	0.005585
	B1-2	2.5				
	B1-3	3.0				
	B1-4	3.5				
	B1-5	4.0				
Tip-2	B2-1	2.0	30	4 Φ 26 2123.7	4 Φ 26 2123.7	0.009439
	B2-2	2.5				
	B2-3	3.0				
	B2-4	3.5				
	B2-5	4.0				
Tip-3	B3-1	2.0	30	4 Φ 32 3217	4 Φ 32 3217	0.01430
	B3-2	2.5				
	B3-3	3.0				
	B3-4	3.5				
	B3-5	4.0				

Tablo 4.Tip-4, 5 ve 6 olarak tasarlanan bağ kiriş modellerine ait donatı oranları ve alanları

Kesit Grubu	Kesit No	l_n/h	Beton Sınıfı	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	$\rho = \rho'$
Tip-4	B4-1	2.0	45	4Φ20 1256.6	4Φ20 1256.6	0.005585
	B4-2	2.5				
	B4-3	3.0				
	B4-4	3.5				
	B4-5	4.0				
Tip-5	B5-1	2.0	45	4Φ26 2123.7	4Φ26 2123.7	0.009439
	B5-2	2.5				
	B5-3	3.0				
	B5-4	3.5				
	B5-5	4.0				
Tip-6	B6-1	2.0	45	4Φ32 3217	4Φ32 3217	0.01430
	B6-2	2.5				
	B6-3	3.0				
	B6-4	3.5				
	B6-5	4.0				

IV. ARAŞTIRMA BULGULARI

Detayları Tablo (3 ve 4)'te verilen ve tip 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olarak tasarlanan geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişi modelleri için moment-eğrilik analizlerinden akma ve maksimum moment ve eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan davranışın iyi anlaşılabilmesi için bağ kirişlerinin uçlarına yakın bölgelerde yığılı plastik mafsallı olduğu varsayılmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen betonarme bağ kirişlerin M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve θ_y değerleri hesaplanarak Tablo (5 ve 7)'de verilmiştir. Farklı tip betonarme bağ kirişlerinin değişen parametrelere göre hesaplanan $(\epsilon_c^{(SH)})$, $(\epsilon_s^{(SH)})$, $(\theta_p^{(SH)})$, $(\epsilon_c^{(KH)})$, $(\epsilon_s^{(KH)})$, $(\theta_p^{(KH)})$, $(\epsilon_c^{(GÖ)})$, $(\epsilon_s^{(GÖ)})$ ve $(\theta_p^{(GÖ)})$ değerleri Tablo (6 ve 8)'de özetlenmiştir. Tablolarda M_y , M_u değerleri; $kN \times m$, K_y , K_u değerleri; $Rad \times 1000/m$ ve Etkin eğilme rijitliği değerleri; $kN \times m^2$ biriminde verilmiştir.

Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişi kesitlerinin analiz ve hesap sonuçlarından elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak Şekil (2, 3, 4, 5 ve 6)'da verilmiştir. Betonarme bağ kirişi modellerinde elde edilen GÖ ve KH performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması $(\epsilon_c^{(GÖ)}, \epsilon_c^{(KH)})$ değerlerinin net açıklık/derinlik oranına göre karşılaştırmalı grafikleri Şekil (2 ve 3)'te verilmiştir. GÖ ve KH performans düzeyi için izin verilen plastik dönme açılarının $(\theta_p^{(GÖ)}, \theta_p^{(KH)})$ net açıklık/derinlik oranına göre karşılaştırmalı grafikleri Şekil (4 ve 5)'te verilmiştir. Akma durumu dönme açısı (θ_y) net açıklık/derinlik oranına göre karşılaştırmalı grafikleri Şekil (6)'da verilmiştir.

TBDY (2018)'de donatı çeliği için göçme öncesi ve kontrollü hasar performans düzeylerinde verilen hasar sınırları $(\epsilon_s^{(KH)}, \epsilon_s^{(GÖ)})$, donatı çeliğinin çekme dayanımına karşı gelen birim uzama değerini sabit katsayılar ile çarparak elde edilmektedir $(\epsilon_s^{(GÖ)} = 0.4\epsilon_{su}, \epsilon_s^{(KH)} = 0.75\epsilon_s^{(GÖ)})$. Sınırlı hasar performans düzeyi için verilen hasar sınırı ise sabit bir değer olarak verilmektedir $(\epsilon_s^{(SH)} = 0.0075)$. Sınırlı hasar performans düzeyi için izin verilen beton birim kısalması TBDY 2018'e göre sabit değer olarak verilmektedir $(\epsilon_c^{(SH)} = 0.0025)$. Göçme öncesi ve kontrollü hasar performans düzeyi için verilen plastik dönme hasar sınırları θ_p ; k_y , k_u , L_p , L_s ve d_b 'nin fonksiyonudur. Dolayısıyla basınç donatısı oranı, sargı donatısı oranı ve çekme donatısı oranı gibi k_y ve k_u değerlerini etkileyen parametreler θ_p 'yi de etkilemektedir. Sınırlı hasar performans düzeyinde taşıyıcı sistemlerde plastik mafsallı oluşmasına izin verilmediği için farklı parametrelere göre betonarme kiriş kesitlerinde $\theta_p^{(SH)} = 0$ elde edilmiştir.

Tablo 5. Tip 1, 2 ve 3 olarak tasarlanan betonarme bağ kirişlerin M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu		Kırılma Durumu		$\mu = \frac{k_u}{k_y}$	θ_y
		M_y	k_y	M_u	k_u		
Tip-1	B1-1						0.00539
	B1-2						0.00534
	B1-3	398	0.0039	485	0.0359	9.2	0.00538
	B1-4						0.00548
	B1-5						0.00561
Tip-2	B2-1						0.00576
	B2-2						0.00572
	B2-3	638	0.0041	770	0.0355	8.6	0.00578
	B2-4						0.00589
	B2-5						0.00604
Tip-3	B3-1						0.00615
	B3-2						0.00613
	B3-3	937	0.0043	1126	0.0349	8.0	0.00620
	B3-4						0.00633
	B3-5						0.00649

Tablo 6. Tip 1, 2 ve 3 olarak tasarlanan betonarme bağ kirişlerin hesaplanan performans seviyeleri

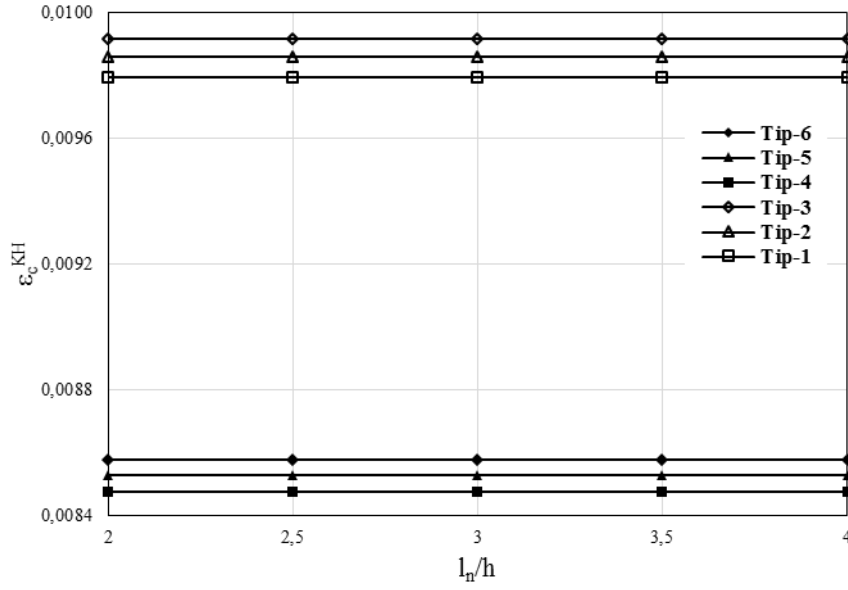
Kesit Grubu	Kesit No	(SH)			(KH)			(GÖ)		
		ϵ_c^{SH}	ϵ_s^{SH}	θ_p^{SH}	ϵ_c^{KH}	ϵ_s^{KH}	θ_p^{KH}	$\epsilon_c^{GÖ}$	$\epsilon_s^{GÖ}$	$\theta_p^{GÖ}$
Tip-1	B1-1						0.00648			0.00864
	B1-2						0.00667			0.00889
	B1-3	0.0025	0.0075	0	0.00979	0.024	0.00681	0.01306	0.032	0.00907
	B1-4						0.00691			0.00921
	B1-5						0.00699			0.00932
Tip-2	B2-1						0.00684			0.00913
	B2-2						0.00703			0.00938
	B2-3	0.0025	0.0075	0	0.00986	0.024	0.00717	0.01314	0.032	0.00956
	B2-4						0.00727			0.00969
	B2-5						0.00734			0.00979
Tip-3	B3-1						0.00716			0.00954
	B3-2						0.00734			0.00978
	B3-3	0.0025	0.0075	0	0.00991	0.024	0.00747	0.01322	0.032	0.00996
	B3-4						0.00757			0.01009
	B3-5						0.00764			0.01019

Tablo 7. Tip 4, 5 ve 6 olarak tasarlanan betonarme bağ kirişlerin M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve θ_y değerleri

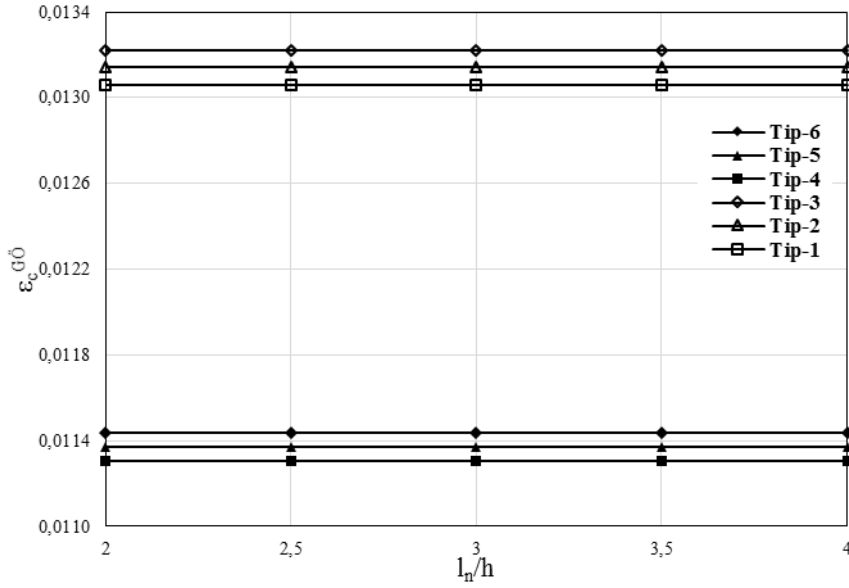
Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu		Kırılma Durumu		$\mu = \frac{k_u}{k_y}$	θ_y
		M_y	k_y	M_u	k_u		
Tip-4	B4-1						0.00520
	B4-2						0.00514
	B4-3	400	0.0038	485	0.0362	9.5	0.00518
	B4-4						0.00527
	B4-5						0.00540
Tip-5	B5-1						0.00548
	B5-2						0.00544
	B5-3	636	0.0040	771	0.0358	9.0	0.00548
	B5-4						0.00559
	B5-5						0.00572
Tip-6	B6-1						0.00579
	B6-2						0.00576
	B6-3	939	0.0042	1128	0.0353	8.5	0.00582
	B6-4						0.00593
	B6-5						0.00608

Tablo 8. Tip 4, 5 ve 6 olarak tasarlanan betonarme bağ kirişlerin hesaplanan performans seviyeleri

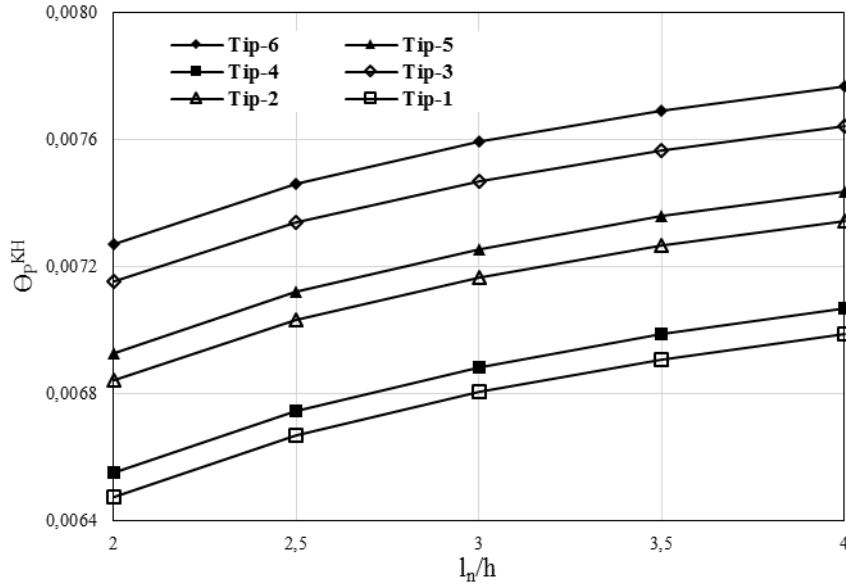
Kesit Grubu	Kesit No	(SH)		(KH)			(GÖ)			
		ϵ_c^{SH}	ϵ_s^{SH}	θ_p^{SH}	ϵ_c^{KH}	ϵ_s^{KH}	θ_p^{KH}	$\epsilon_c^{GÖ}$	$\epsilon_s^{GÖ}$	$\theta_p^{GÖ}$
Tip-4	B4-1									0.00873
	B4-2									0.00899
	B4-3	0.0025	0.0075	0	0.00848	0.024	0.00688	0.01130	0.032	0.00918
	B4-4									0.00932
	B4-5									0.00942
Tip-5	B5-1									0.00924
	B5-2									0.00949
	B5-3	0.0025	0.0075	0	0.00853	0.024	0.00726	0.01137	0.032	0.00967
	B5-4									0.00981
	B5-5									0.00991
Tip-6	B6-1									0.00970
	B6-2									0.00994
	B6-3	0.0025	0.0075	0	0.00858	0.024	0.00759	0.01144	0.032	0.01012
	B6-4									0.01025
	B6-5									0.01036



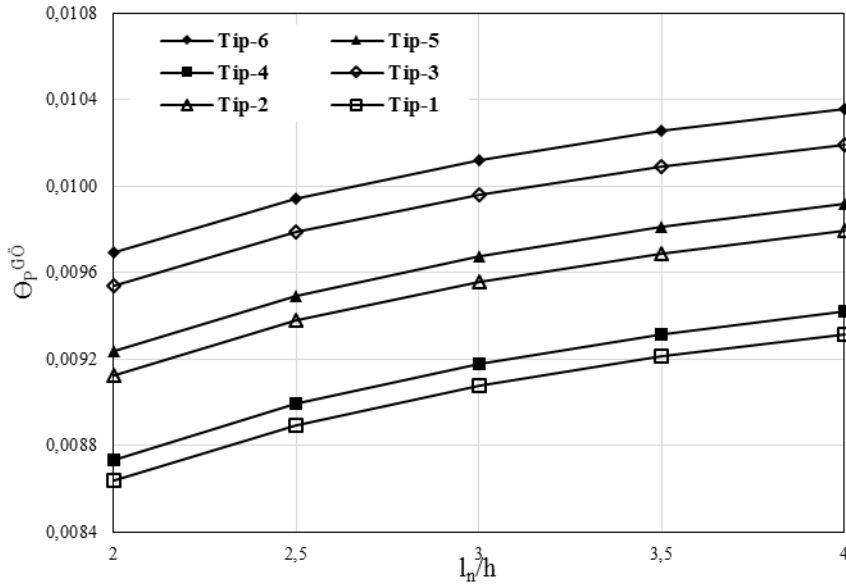
Şekil 2. Betonarme bağ kirişlerinin $\epsilon_c^{KH} - l_n/h$ değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri



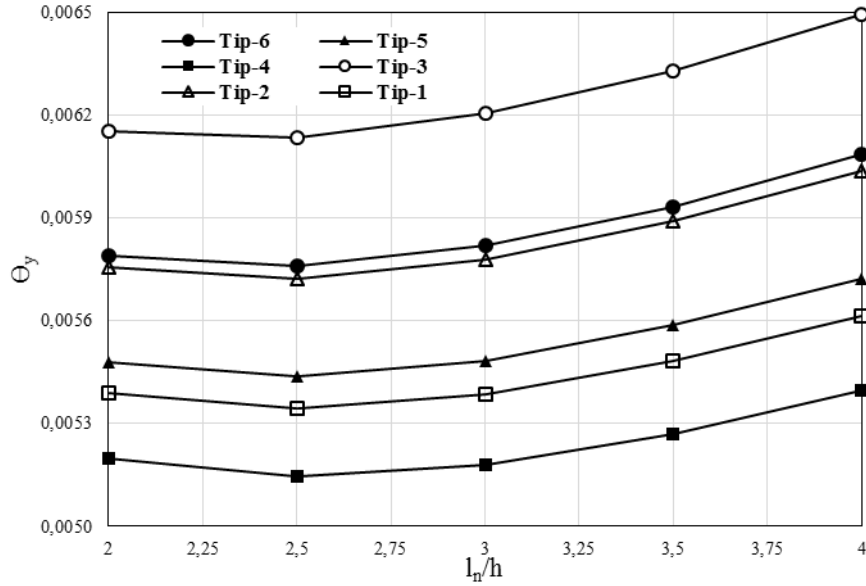
Şekil 3. Betonarme bağ kirişlerinin $\epsilon_c^{G0} - l_n/h$ değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri



Şekil 4. Betonarme bağ kirişlerinin $\Theta_p^{KH} - l_n/h$ değerlerinin karşılaştırılmalı grafikleri



Şekil 5. Betonarme bağ kirişlerinin $\Theta_p^{G0} - l_n/h$ değerlerinin karşılaştırılmalı grafikleri



Şekil 6. Betonarme bağ kirişlerinin $\theta_y - l_n/h$ değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri

Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerin hasar sınırlarını tanımlayan birim şekil değiştirme ve iç kuvvet değerleri TBDY 2018'e göre hesaplanmıştır. Hesaplanan hasar sınırları diğer bir deyişle izin verilen beton birim kısalması, donatı çeliğin birim uzaması ve izin verilen dönme açıları Tablo (6 ve 8)'de verilmiştir. Araştırma bulgular bölümünde, betonarme bağ kirişlerinin davranışı için elde edilen yorum ve değerlendirmeler araştırma sonuçları bölümünde karşılaştırarak yorumlanmıştır.

V. SONUÇ

Araştırma bulgular bölümünde geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin hasar sınırlarının sonuçları maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinde; beton basınç dayanımının artması ile:

- Akma momenti (M_y) ve maksimum moment (M_u) değerleri yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.
- Akma eğriliği (k_y) %2,6 azalmakta ve maksimum momente karşı gelen eğrilik (k_u) değerleri %0,83 artmaktadır.
- Eğrilik süneklik (μ) değerleri yaklaşık %3,26 artmaktadır.
- Plastik mafsallı akma dönmesi (θ_y) değerleri %3,5'den %5,85'e kadar azalmaktadır.
- Kontrollü hasar ve Göçme öncesi performans düzeyinde izin verilen beton birim kısalması ($\epsilon_c^{(KH)}$ ve $\epsilon_c^{(GÖ)}$) değerleri %13,4'ten %13,48'e kadar azalmaktadır.
- Kontrollü hasar ve Göçme öncesi performans düzeyinde izin verilen plastik mafsallı dönmesi değerleri ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) sırasıyla %1,07'den %1,84'e ve %1,03'ten %1,64'e kadar artmaktadır.

Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinde; net açıklık derinlik oranının artması ile:

- Akma ve maksimum moment taşıma kapasitesi (M_y , M_u), akma ve maksimum momente karşı gelen eğrilikleri (k_y , k_u) ve eğrilik süneklik (μ) değerleri sabit kalmaktadır.
- Net açıklık/derinlik oranı 2 ve 2,5 arasında olan betonarme bağ kirişlerde plastik mafsallı akma dönme açısı değerleri (θ_y) %0,32'den %1,15'e kadar azalmaktadır.

- Net açıklık derinlik oranı 2,5 ve 4 arasında olan betonarme bağ kirişlerde plastik mafsal akma dönme açısı değerleri (θ_y) %3,7'den %5,29'e kadar artmaktadır.
- KH ve GÖ performans düzeyi için beton birim kısalması ($\epsilon_c^{(KH)}$ ve $\epsilon_c^{(GÖ)}$) değerleri sabit kalmaktadır.
- KH ve GÖ düzeyleri için izin verilen dönme açısı değerleri ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) sırasıyla %6,28'den %11,7 ve %6,37'den %7,32'ye kadar artmaktadır.

Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinde; çekme ve basınç donatısı oranı artması ile:

- Akma momenti (M_y) %135, maksimum moment (M_u) %132,2 ve akma eğriliği (k_y) %9,3'ten %10,5'e kadar değerleri artmaktadır.
- Maksimum momente karşı gelen eğrilik (k_u) %2,55'ten %2,86 ve eğrilik sünekliği (μ) %11,76'dan %15'e kadar değerleri azalmaktadır.
- Plastik mafsal akma dönmesi (θ_y) %11,3'ten %15,7'ye kadar değerleri artmaktadır.
- Kontrollü hasar ve göçme öncesi performans düzeyinde izin verilen beton birim kısalması ($\epsilon_c^{(KH)}$ ve $\epsilon_c^{(GÖ)}$) sırasıyla %1,2 ve %1,24 değerleri artmaktadır.
- Kontrollü hasar ve göçme öncesi performans düzeyinde izin verilen dönme açıları ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) sırasıyla %9,3'ten %10,99 ve %9,33'ten %11,11'e kadar değerleri artmaktadır.

Beton basınç dayanımının artırılması, geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerin akma momentine (M_y), kırılma momentine (M_u), kontrollü hasar ve göçmenin önlenmesi performans düzeyi dönme açılarına ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) etkili olduğu ispatlanmıştır.

Geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerinin net açıklık derinlik/oranın artırılması; KH ve GÖ performans düzeyleri için izin verilen plastik dönme açılarına ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) ve akma durumu için yer değiştirmiş eksen dönmesi üzerine (θ_y) etkili olduğunu gözlemlenmiştir.

Çekme ve basınç donatısı oranı artırılması, geleneksel donatılmış betonarme bağ kirişlerin akma ve maksimum moment taşıma kapasitesine, akma eğriliğine, akma dönme açısına, kontrollü hasar ve göçme öncesinin performans seviyesinde izin verilen beton birim kısalmasına ve dönme açılarına etkili olduğunu ispatlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Ersoy, U. ve Özcebe G. (1998). Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi Analitik Bir İnceleme. *Teknik Dergi*, 9(4), 1998-1827.
- [2] Sönmez, İbrahim K, 2010. "Betonarme Yapı Sistemlerinde Yapısal Performans Düzeyini Belirleyen bir Bilgisayar Programı Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] S. F Breña, O. İhtiyar, "Performance of conventionally reinforced coupling beams subjected to cyclic loading". *J StructEng*, 137:665–76, 2011.
- [4] S. El-Tawil, K. A. Harries, P. J. Fortney, B. M. Shahrooz, and Y. Kurama, "Seismic design of hybrid coupled wall systems: state of the art" *Journal of structural engineering*, vol. 136, no. 7, pp. 755–769, 2010.
- [5] C.-C. Hung and W.-T. Lu, "A performance-based design method for coupled wall structures," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 579–603, 2016.
- [6] TBDY, 2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- [7] SAP2000. *Structural software for analysis and design*, Computers and Structures, Inc. Version 20.0.0. USA.

- [8] Çağlar, N., Akkaya, A., Demir, A., Öztürk, H., 2004. *Farklı Kesit Geometrilerine Sahip Betonarme Kolonların Davranışının İncelenmesi*, ISITES2014, p. 2095-2105, Karabük/Türkiye.
- [9] TS500, 2000, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara.

Araştırma Makalesi - Research Article

Silika Aerojel katkılı Alkali-Aktive Edilmiş Uçucu Kül Harçlarının Mekanik, Por Yapısı ve Mikro Yapı Özellikleri

Levent Bostancı^{1*}

Geliş / Received: 13/04/2020

Revize / Revised: 16/07/2020

Kabul / Accepted: 17/07/2020

ÖZ

Silika aerojeller, çimento matrisine dâhil edildiklerinde yüksek poroziteleri aracılığıyla çimento esaslı malzemelerin akustik ve termal yalıtım performanslarına katkı sunabilmektedirler. Silika aerojel partikülleri, yüksek porozitelerine rağmen mekanik zorlamalar altında ihmal edilemeyecek düzeyde mekanik özellikler de gösterebilmektedirler. Bu çalışmada çimento ağırlığınca düşük katkı oranlarında (%0.25 ve %0.50) çimento matrisine dâhil edilen silika aerojellerin alkali – aktive edilmiş uçucu kül harçlarının mekanik, por yapısı ve mikro yapı özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, ortalama 20 MPa basınç dayanımına sahip uçucu kül harçlarının basınç etkisi altındaki tokluk ve pik – sonrası tokluk kapasitelerinin sırasıyla yaklaşık %27 ve %70 düzeylerinde artabileceğini ortaya koymaktadır. Harç numunelerinin por yapısında mikro ve kapiler boyuttaki por çaplarının değişimine bağlı olarak elde edilen tokluk kazancı, gelecekte eşdeğer basınç dayanımları altında deformasyon davranışı geliştirilmiş silika aerojel katkılı blok elemanların üretimi için yenilikçi bir tasarım fikrini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler- Silika Aerojel, Uçucu Kül, Alkali-Aktive Edilmiş Harç, Tokluk, Porozite

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: leventbostanci@beykent.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4686-9102>)
İnşaat Teknolojisi Programı, Beykent Üniversitesi, İstanbul

Mechanical, Pore Structure and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Mortars Containing Silica Aerogel

ABSTRACT

Inclusion of silica aerogels in cement matrix can lead to an enhancement in thermal and acoustic properties of cement – based materials due to the high porosity values of silica aerogel particles. Despite their high porosity values, silica aerogel particles can also show sufficient mechanical performance under stress. In this study, mechanical, pore structure and microstructure properties of alkali – activated fly ash mortars containing a small amount of silica aerogel powder (0.25% and 0.50% of binder, by weight) were investigated. The results obtained from the experimental study reveal that the compressive toughness and compressive post-peak toughness capacities of fly ash mortars with an average compressive strength of 20 MPa could increase by about 27% and 70%, respectively. Toughness development obtained via the change in the micro and capillary pore formation in the pore structure of the mortar samples presents an innovative design idea for the production of silica aerogel-incorporated mortar blocks with improved deformation behavior under equivalent compressive stress.

Keywords- *Silica Aerogel, Fly Ash, Alkali-Activated Mortar, Toughness, Porosity*

I.GİRİŞ

A. Arka Plan

Enerjinin ekonomik olarak kullanılması fikri, tüm endüstriyel alanlarda olduğu gibi inşaat sektöründe de uygulanması kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir. İnşaat sektöründe yürütülen faaliyetler yüksek düzeyde enerji tüketimini gerektirmektedir. Artan enerji tüketimi ile global ısınma düzeyi de artmakta ve bu durum gerek ekosistem gerekse ekonomi açısından telafisi mümkün olmayan sonuçlar doğurmaktadır [1]. Çimento teknolojisinde 1 kg çimento üretimi esnasında yaklaşık 1.0 kg CO₂ salınımı gerçekleşmekte ve eş zamanlı olarak da kg başına 1.5 kWh enerji harcanmaktadır [2]. Çimento üretiminin yüksek maliyeti ve CO₂ salınımı göz önüne alınarak günümüzde çimento harçları yerine bağlayıcı malzeme içeriğinde çimento miktarının azaltıldığı çevre-dostu harç tasarımları üzerine sıkça deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir [3,4].

Günümüzde çimento harçlarına alternatif olarak üretilen alkali – aktive edilmiş harçlar aracılığıyla çimento üretimi kaynaklı CO₂ salınımı %80 düzeyinde azaltılabilmektedir. Bu noktada; alkali – aktive edilmiş harçların yaygınlaşması ekosistemin geleceği açısından önem arz etmektedir [5]. Alkali-aktive edilmiş harçlarda toz formdaki alüminosilikat kaynağı değişen küre ve nem koşullarında alkali aktivatör ile kimyasal reaksiyona girerek yüksek dayanımlı, üstün durabilite özelliklerine sahip ve düşük hidrasyon ısılı harç oluşturabilmektedir. Alkali-aktive edilmiş harçlarda alüminosilikat kaynağı olarak ise endüstriyel yan ürün olarak tabir edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu kül sıkça tercih edilmektedir [6].

Uçucu küller, kimyasal kompozisyonlarında yer alan kalsiyum oksit (CaO) miktarına bağlı olarak ASTM C-618 [7]'e göre C ve F sınıfı uçucu küller olmak üzere iki farklı tipte tanımlanmaktadır. C sınıfı uçucu küller, santrallerde linyit kömürünün yakımı ile elde edilmektedir. Kimyasal kompozisyonunda %20'den daha fazla CaO barındıran C sınıfı uçucu küllerde SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃'ün toplam miktarı %50-70 aralığında değişmektedir. F sınıfı uçucu küller ise antrasit veya bitümlü kömür yakımı neticesinde elde edildikleri için kimyasal kompozisyonlarında genellikle %10'dan daha düşük seviyede CaO barındırırlar. F sınıfı uçucu küllerde SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃'ün toplam miktarı da %70'ten fazladır [8 -10]. Uçucu küller, kimyasal kompozisyonlarında yüksek düzeyde Al₂O₃ ve SiO₂ içerdiklerinden alkali aktivasyonu için bağlayıcılık potansiyeli açısından oldukça cazip gözükmektedirler [11].

B. Literatür Taraması

Önceki deneysel çalışmalarda, harç karışımlarındaki çimentonun uçucu kül ile yer değişiminin harçın mekanik özelliklerine olan etkisi sıkça incelenmiştir. Literatürde uçucu kül içeren karışım numunelerinde kontrol durumuna kıyasla daha yüksek basınç dayanımlarının elde edilebilmesi için uçucu kül içeriğinin %10 veya %20 gibi düşük düzeylerde kullanılması önerilmiştir [12]. Karahan ve Atis [13] beton karışımlarında ağırlıkça %15 ve %30 düzeylerinde çimento ile uçucu külü yer değiştirerek fiber katkılı beton numunelerinin mekanik ve durabilite özelliklerinin değişimini araştırdılar. Sonuçlar, artan uçucu kül içeriği ile dayanımların düştüğünü ve kontrol numunesine kıyasla %15 ve %30 düzeylerindeki uçucu kül içeriği için dayanımlarda sırasıyla %17 ve %30 düzeylerde kayıpların oluştuğunu göstermiştir. Yerramala vd. [14] ürettikleri harç karışımlarında % 0-25 oranlarında çimento ile uçucu külü yer değiştirerek %25 oranındaki uçucu kül içeriği için basınç dayanımlarını 7. ve 28. günlerde sırasıyla 10.4 ve 19.6 MPa olarak tespit ettiler. Yüksek basınç dayanımı hedefi için optimum uçucu kül içeriğinin %10 olmasını gerektiğini rapor ettiler. Al Zaidi vd. [15] harç karışımlarında bağlayıcı malzeme içeriğinde %50 düzeyinde uçucu kül içeren harç numuneleri ürettikler. Kullanılan uçucu kül içeriğinin yüksek düzeyine bağlı olarak çimento matrisinde uzun yıllar süreceğini öngördükleri yavaş hidrolik etkileşime dikkat çektiler.

Endüstriyel atık türü bağlayıcıların çimento yerine kısmi düzeyde kullanıldığı harçlarda numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıplara ilaveten tokluk kapasitelerinin de azaldığı bilinmektedir [16]. Azalan tokluk davranışının telafi edilmemesi durumu, atık türü bağlayıcı içeren harçların kullanımını kısıtlayarak eko sistem açısından sunduğu avantajlardan yararlanılmasının önünde engel teşkil etmektedir. Küresel formdaki uçucu kül tanecikleri, çimento matrisinde kısmen kimyasal bağ etkileşimini zayıflatabilmektedir [17]. Guades [18] uçucu kül içerikli jeopolimer harçlarının mekanik özelliklerinin kum – uçucu kül oranına bağlı olarak değişimini araştırmıştır. Uçucu kül harçları için 12.4 MPa lık basınç dayanımı değeri altında oldukça gevrek bir kırılma

mekanizması tespit edilmiştir. Bu sebeple uçucu kül harçlarında tokluk özelliklerinin gelişimi için genellikle lif katkısı tercih edilmektedir. Xu vd. [19] uçucu kül esaslı jeopolimer harçlarında 8 ve 12 mm uzunluğundaki PVA lifleri kullanarak eğilme etkisi altındaki tokluk davranışını incelediler. Sonuçlar, tokluk özelliklerinin 12 mm uzunluğundaki PVA lifleri aracılığı ile %1300 düzeyinde gelişebileceğini göstermiştir.

Malzeme biliminde çimento esaslı malzemelerin mekanik ve yalıtım performanslarının geliştirilmesi adına nano boyuttaki malzemelerin çimento matrisine dahil edilmesi üzerine de sıkça çalışılmaktadır. Nano-malzemeler, kalsiyum silikat yapısı içerisinde genellikle boşluk doldurarak mikro yapı özelliklerini geliştirmekte ve kökenlerine bağlı olarak aynı zamanda hidrolik aktiviteyi vasıtasıyla da hidrasyon sürecine ciddi düzeyde etki edebilmektedir [20]. Son yıllarda, nano-malzemeler arasında silika aerojelleri esas alan çalışmalar hızla artmaktadır. Silika aerojeller, hidrolik aktive göstermemekle birlikte kendilerine özgü por yapısı ile yüksek düzeydeki hava içeriğine rağmen katı iskeletlerini koruyacak şekilde üretilmektedir [21]. Dünyanın en hafif katısı olarak kabul edilen silika aerojellerin çimento esaslı karışımlarda kullanılması genellikle malzemelerin termal yalıtım [22-26] veya akustik yalıtım [27] performanslarının artırılması üzerine odaklıdır. Ancak, silika aerojeller %99.8 düzeyine erişebilen por hacmine rağmen kendi kütlelerinin 1600 katı kadar da yük taşıyabilmektedirler [28]. Partikül yoğunluklarının, hava partiküllerine kıyasla 4 -5 kat daha fazla olduğu bilinmektedir [29]. Alkali- aktive edilmiş harçlarda silika aerojellerin düşük katkı oranlarında kullanımına yönelik çalışmalar sınırlı düzeydedir. Yapılan çalışmalar, eşit aktivatör dozajı için karışımlarda optimum düzeyde artan aerjel katkısı ile kısmi olarak dayanım artışının saptanabileceğini göstermektedir [4].

Çimento esaslı malzemelerde silika aerojeller genellikle yüksek yalıtım hedefleri doğrultusunda kum ile yer değiştirilerek yüksek düzeylerde kullanılmakta ve kaçınılmaz olarak eğilme ve basınç dayanımlarında büyük düşüşler saptanmaktadır [15]. Yüksek dayanımlı beton üretiminde %50 düzeyinde kullanılan silika aerjel içeriği sebebiyle basınç dayanımı 20 MPa seviyesine indirgenmektedir [30]. Meydana gelen dayanım düşüşleri esasen silika aerojellerin çimento esaslı malzemelerde hafif agrega olarak fonksiyonel rol üstlenmesi ile alakalıdır. Hanif vd. [23] 28 günlük yaşta yüksek düzeydeki silika aerjel içeriği için 1187 kg/m³'lük birim hacim ağırlığa karşın basınç dayanımını 18.63 MPa olarak tespit etmişlerdir. Aynı kür süresi sonunda ise eğilme dayanımı 3.66 MPa olarak saptanmıştır. Liu vd. [24] ise hacimce %60 oranında aerjel içeren numunelerde 2.15 MPa'lık basınç dayanımı ve 0.45 MPa'lık eğilme dayanımı tespit etmişlerdir. Öte yandan, karışımlarında silika aerjelin çimento katkı maddesi olarak kullanımında ise, silika aerjel katkısının düşük içeriği nedeniyle mekanik dayanımlarda genellikle ciddi düzeyde düşüşler görülmektedir [4]. Bostancı vd. [26] silika aerjel içeriğinin % 0.1 den % 0.7 e kadar olan artışı için basınç dayanımlarında benzer dayanım değerlerini saptarken %1.0 aerjel katkı oranında ise kontrol numunesine kıyasla 56.5 MPa' dan 57.0 MPa' kadar kısmi bir artışında saptanabileceğini ortaya koymuştur.

C. Araştırmanın Önemi

Silika aerojeller üzerine yakın geçmişte yapılan çalışmalar, silika aerojellerin yüksek porozite değerlerini göz önüne alarak genellikle numunelerin akustik, yangın ve ısı yalıtım performanslarına olan katkıları üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada ise silika aerojellerin yüksek porozite değerlerine rağmen sahip oldukları mekanik özellikler göz önüne alınarak alkali – aktive edilmiş uçucu kül harçlarının basınç etkisi altındaki tokluk özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın odak noktası, ortalama 20 MPa basınç dayanımına sahip harç numunelerindeki deformasyon davranışının silika aerjel katkısı ile değişiminin araştırılması üzerinedir. Silika aerjel katkısının eşdeğer basınç dayanımları altında numunelerin deformasyon gelişimine olan etki mekanizmasının anlaşılması özellikle yapı duvarlarında kullanılacak çimento esaslı ve silika aerjel katkılı blok elemanların gelecekteki tasarım girişimleri için önem arz etmektedir.

II.MALZEME VE YÖNTEM

A. Kullanılan Malzemeler

1) *Alkali Aktivatör:* Harç karışımlarında alkali-aktivasyon işlemi sodyum karbonat (Na₂CO₃) ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan Na₂CO₃ için kimyasal kompozisyon Tablo 1' de sunulmuştur.

Tablo 1. Kullanılan Na_2CO_3 'ün kimyasal kompozisyonu.

Bileşen	(%)
Na_2CO_3	Min. 99.5
NaCl	Max. 0.1
Na_2SO_4	Max. 0.1
Çözünmeyen kalıntı	Max. 0.05

2) *Bağlayıcı Malzemeler:* Üretilen harç karışımlarından bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 R tipi çimento ile uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının (%68.31) %50'nin üzerinde olması dikkate alındığında ASTM C-618 [7] standardına göre C sınıfı uçucu kül olarak tanımlanmaktadır. Kullanılan çimento ve uçucu küle ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 2. Çimento ve uçucu kül için kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler.

	Çimento	Uçucu kül
Kimyasal kompozisyon (wt/wt %)		
SiO_2	19.78	43.56
Al_2O_3	5.13	20.57
Fe_2O_3	3.67	4.18
CaO	63.27	24.54
MgO	2.12	1.76
SO_3	2.94	1.44
K_2O	0.87	1.29
Na_2O	0.22	0.32
Cl^-	0.01	0.007
Fiziksel özellikler		
Yoğunluk (g/cm^3)	3.16	2.4
Özgül yüzey alanı (cm^2/g)	3580	2900

3) *Kum:* Harç karışımlarında ince agrega olarak TS EN 196-1 [31] standardına uygun olarak hazırlanmış Rilem kumu kullanılmıştır.

4) *Silika Aerojel:* Harç karışımlarında Ensate Yalıtım Mühendislik Proje San. Ve Tic. Ltd. Şti tarafından sipariş üzerine üretilmiş olan toz formdaki silika aerojel kullanılmıştır. Kullanılan silika aerojele ait fiziksel özellikler Tablo 3' de görülmektedir.

Tablo 3. Kullanılan silika aerojelin fiziksel özellikleri.

Yüzey alanı (m ² /gr)	790–840
Ortalama por çapı (nm)	8–10
Porozite (%)	>%94
Görünür yoğunluk (kg/m ³)	90–100
Yüzey grubu	– OH

B. Karışım Oranları

DeneySEL çalışmalar kapsamında üretilen harç numunelerinde harç karışımlarına düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısının numunelerin mekanik, por yapısı ve mikro yapı özelliklerine olan etkisini araştırmak için 5 farklı katkı oranlarında harç karışımları oluşturulmuştur. Harç karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak çimento ve uçucu külden oluşan hibrit bağlayıcı kullanılmıştır. Ortalama 20 MPa düzeyinde basınç dayanımı hedeflenen deneySEL çalışmalarda uçucu külün çimentoya kıyasla daha düşük hidrolik aktivitesi sebebiyle tüm karışımlarda uçucu kül- çimento yer değişimi %50 düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Silika aerojel katkısı, karışımlara bağlayıcı malzeme ağırlığına %0.25 (1.125 g) ve %0.50 (2.25 g) katkı oranlarında ilave edilmiştir. Literatürdeki deneySEL çalışmalarda karbonat kökenli alkali aktivatörlerin bağlayıcı malzeme içeriğinde yüksek düzeyde atık türü bağlayıcı bulunduran harçlarının mekanik performanslarına katkı sunabildiği bilinmektedir [4]. Bu sebeple, karışımlardaki uçucu külün çimentoya nazaran düşük hidrolik aktivitesini geliştirmek için bağlayıcı malzeme ağırlığına %0.1 (0.45 g) ve %0.2 (0.9 g) dozajlarında sodyum karbonat da alkali aktivatör olarak karışımlarda kullanılmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.50 olarak düzenlenmiş ve karma suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır. Karışımlarda silika aerojel içermeyen K1 numunesi “kontrol numunesi” olarak adlandırılırken rölatif olarak %0.25 aerojel katkılı numuneler “düşük aerojel içerikli numuneler”, %0.50 aerojel katkılı numuneler ise “yüksek aerojel katkılı numuneler” olarak nitelendirilmiştir. Harç karışım oranları Tablo 4’ de görülmektedir.

Tablo 4. Harç karışım oranları.

Karışım numunesi	Aerojel (g)	Na ₂ CO ₃ (g)	Uçucu kül (g)	Çimento (g)	Su/Bağlayıcı	Su (ml)	Kum (g)
K1	0	0.45	225	225	0.50	225	1350
K2	1.125	0.45					
K3	1.125	0.9					
K4	2.25	0.45					
K5	2.25	0.9					

C. Numune Hazırlanması, Kür Koşulları ve Uygulanan Deneyler

DeneySEL çalışmalar kapsamında TS EN 196-1 [31] standardına uygun olarak her bir karışımdan üçer adet olmak üzere 40x40x160 mm ölçülerinde tek tip prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Deneylerde kullanılan silika aerojel partiküllerinin karışımlardaki homojenliğini arttırmak amacıyla başlangıçta kuru bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımlara su ilavesi azar azar yapılmış ve aerojel partiküllerinin bağlayıcı malzeme ile tamamen kaplanmasına özellikle dikkat edilmiştir. Üretilen taze harç karışımları kalıp içerisine alındıktan sonra etkin bir vibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Harç numuneleri laboratuvar koşullarında 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve 2,7 ve 28 günlük farklı kür periyotları için 20 ± 2 °C sıcaklığındaki kür havuzuna alınmıştır. Kür süresini tamamlayan harç numuneleri sırasıyla basınç, porozimetre ve mikro yapı analizi testlerine tabi tutulmuşlardır.

Silika aerojel katkılı harç numunelerinin basınç etkisi altındaki mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin ardından harç numunelerine öncelikli olarak deformasyon kontrollü basınç testi uygulanmıştır. Test esnasında deformasyon artış hızı 0.1 mm/dk. olarak ayarlanmış ve numunelerin basınç etkisi altındaki eksenel deformasyonları doğrusal değişken diferansiyel transformatörler (LVDT'ler) aracılığı ile ölçülerek kaydedilmiştir. Bu amaçla test esnasında öncelikle numunelerde oluşan basınç yükü – deformasyon verileri kaydedilmiş ve elde edilen veri okumaları, yük – deformasyon eğrisini çizmek için bilgisayara aktarılmıştır. Karışım numunesinin basınç dayanımı, üç adet test sonucunun ortalaması alınarak TS EN 1015-11[32] standardı esaslarına göre tespit edilmiştir. Deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen test sayesinde numunelerin basınç etkisi altındaki dayanımlarının yanı sıra elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme diyagramları aracılığı ile basınç modülü, basınç tokluğu, pik – öncesi basınç tokluğu ve pik – sonrası basınç tokluğu özellikleri de 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri için ayrıca saptanabilmektedir.

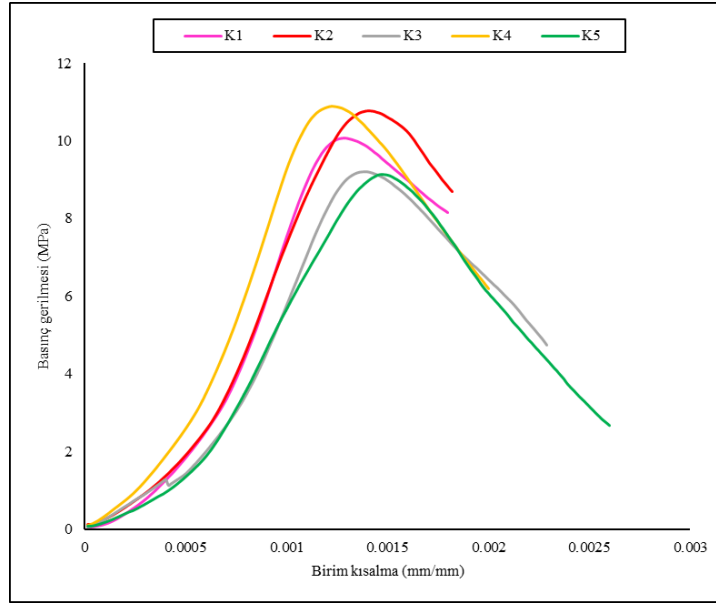
Basınç dayanımı testinden geriye kalan parçalar üzerinden cıva porozimetresi testi gerçekleştirilmiştir. Porozimetre testi 28 günlük numune parçalarına uygulanmış ve Micromeritics marka porozimetre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz 3,0 – 360,000 nanometre (nm) çap aralığındaki por çaplarını tespit edilebilmektedir. Cıva porozimetresi analizi aracılığı numunelerde porozite, ortalama por çapı, kümülatif por hacmi – por çapı ilişkileri ve spesifik çap aralıklarındaki por içeriği dağılımları saptanmıştır.

Cıva porozimetresi analizine benzer şekilde 28 günlük basınç testinden geriye kalan numune parçaları üzerinden harç numunelerinin mikro yapı özelliklerinin tespiti amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Basınç testi sonrasında oluşan kırılma yüzeyi üzerinden hassas olarak alınan toz halindeki numune parçaları mikro yapı analizi için kullanılmıştır. SEM analizleri LEO 1430 VP model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

III.BULGULAR VE TARTIŞMALAR

A. Basınç Dayanımı Test Sonuçları

1) 2 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımı: Harç numunelerinde 2 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından basınç dayanımları 9.14 – 10.89 MPa aralığında tespit edilmiştir. Numuneler için elde edilen basınç gerilmesi – birim kısalma ilişkisi Şekil 1' de görülmektedir.

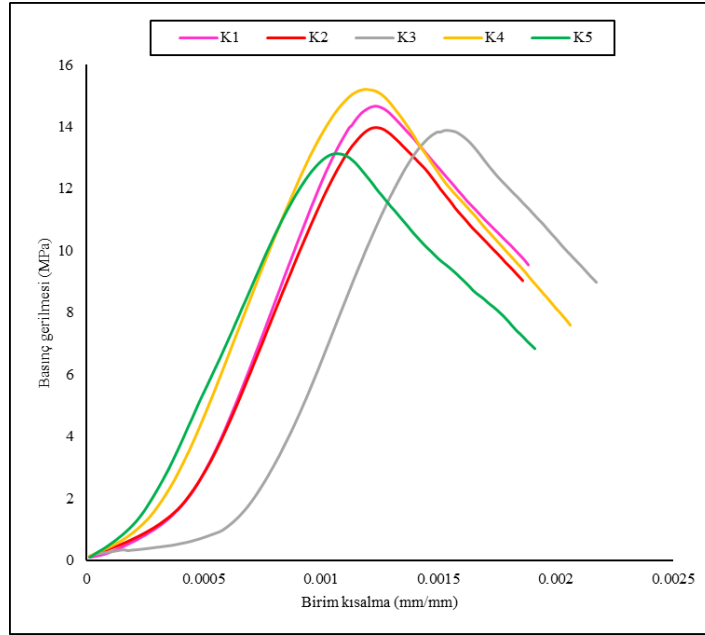


Şekil 1. 2 günlük numunelerde gerilme – birim kısalma ilişkisi.

Aerojel katkısı içermeyen kontrol numunesinde 2 günlük kür süresi sonunda 10.08 MPa'lık basınç dayanımı tespit edilmiştir. Eşit aktivatör dozajında, karışımlara ilave edilen %0.25 ve %0.50 katkı oranlarındaki silika aerojel katkısı nedeniyle K2 ve K4 numunelerinde kontrol numunesine sırasıyla %6.74 ve %8.03 düzeylerinde dayanım artışları tespit edilmiştir. Öte yandan; eşit aerojel katkı oranlarında artan aktivatör dozajı basınç dayanımlarında kısmi oranda düşümlere sebep olmaktadır. Karışımlarda %0.1'den %0.2'e çıkan aktivatör dozajı nedeniyle K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde %14.4 ve K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde %16.06 düzeylerinde düşüşler saptanmıştır.

Harç karışımlarına eşit aktivatör dozajında ilave edilen düşük düzeydeki aerojel katkısı, hidrasyonun ilk 2 günlük periyodu sonunda numunelerin dayanım özelliklerinin yanı sıra basınç etkisi altındaki deformasyon kapasitelerine de olumlu yönde etki etmiştir. K1 numunesine kıyasla K4 numunesinde kırılma anında %11.76 seviyesinde daha yüksek deformasyon yeteneği gözlemlenmiştir. K2 numunesinde de K1 numunesi ile eşit düzeyde deformasyon kapasitesi saptanmıştır. Bu noktada; %0.25 katkı oranındaki aerojel içeriğinin dayanım artışına olanak sağlarken deformasyon davranışını değiştirmedeği ancak artan aerojel içeriğinin kırılma anındaki deformasyon kapasitesine dayanıma sunduğu katkıdan daha da fazlasını sunabildiği söylenebilir. Bununla birlikte; eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajının 2 günlük kür süresi sonunda numunelerin deformasyon davranışını son derece olumlu etkilediği görülmektedir. Artan aktivatör dozajı sebebiyle kırılma anında, K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde %29.41 ve K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde %36.84 düzeylerinde daha yüksek deformasyon kapasiteleri tespit edilmiştir. Özellikle K5 numunesi için tespit edilen deformasyon kapasitesindeki artış kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında saptanan %52.94 düzeyindeki deformasyon kapasite gelişimi oldukça değerlidir. 2 günlük kür süresi için tespit edilen sonuçlar, eşit aerojel katkı oranlarında artan aktivatör dozajının numunelerin dayanım değerlerine kıyasla deformasyon kapasitelerine katkı sağladığını işaret etmektedir.

2) 7 günlük numunelerde basınç dayanımı: Şekil 2 'de 7 günlük numunelere ait basınç gerilmesi – birim deformasyon ilişkisi görülmektedir. Numunelerin basınç dayanımları 13.11 – 15.2 MPa aralığında saptanmıştır.

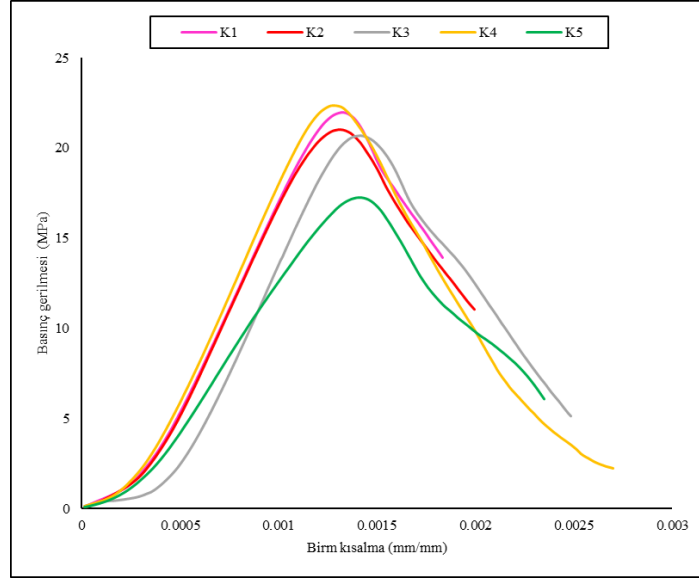


Şekil 2. 7 günlük numunelerde gerilme – birim kısalma ilişkisi.

7 günlük kür süresinin tamamlanması ile K1 kontrol numunesinde 14.65 MPa'lık basınç dayanımı tespit edilmiştir. Karışımlara ilave edilen düşük katkı oranındaki silika aerojel içeriği %0.25 ve %0.50 katkı oranları için dayanım değerleri üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. K1 numunesine kıyasla K2 numunesinde %4.57 değerinde dayanım düşüşü saptanırken K4 numunesinde ise %3.74 düzeyinde dayanım artışı saptanmıştır. Sonuçlar, 2 günlük kür süresinden farklı olarak %0.25 düzeyindeki aerojel içeriğinin kısmi oranda dayanım düşüşüne sebep olduğunu ancak %0.50 oranındaki aerojel içeriğinin ise 2 günlük kür süresinde olduğu gibi kısmi düzeyde dayanım artışına olanak sağladığını işaret etmektedir. Bununla birlikte eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı numunelerin dayanım değerlerinde kısmi düzeyde düşümlere neden olmaktadır. Tespit edilen düşümler K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde %0.78 düzeyinde iken K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde %13.75 seviyesindedir. Artan aktivatör dozajı düşük aerojel katkı oranında sınırlı seviyede dayanım düşüşünü işaret ederken daha yüksek aerojel içeriğinde dayanım farkı artmaktadır.

2 günlük kür süresine benzer şekilde eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen aerojel içeriği, %0.25 katkı oranı için K1 ve K2 numunelerinin deformasyon yetenekleri arasında bir değişim yaratmamaktadır. Ancak %0.25' den %0.50'e çıkan aerojel içeriği, K1 numunesine kıyasla K4 numunesinde kırılma anı için %11.11 düzeyinde daha yüksek deformasyon kapasitesini işaret etmektedir. Bununla birlikte; K3 numunesinde K2 numunesine kıyasla %0.78 düzeyinde dayanım düşüşü tespit edilmesine rağmen K3 numunesinde eşit aktivatör dozajında artan aktivatör dozajı sebebiyle deformasyon kapasitesi %16.66 seviyesinde gelişmektedir. %0.50 aerojel katkı oranında ise artan aktivatör dozajı dayanım değerlerinde olduğu gibi deformasyon kapasitesinde de düşümlere yol açmaktadır. Bu noktada elde edilen sonuçlar, eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajının dayanım değerlerinden çok deformasyon davranışı üzerinde etkili olduğunu işaret etmektedir. 7 günlük kür süresi için mekanik özellikler üzerinde saptanan olumlu etkiler, düşük aerojel katkı oranı (%0.25) – yüksek aktivatör dozajı (%0.2) ve yüksek aerojel katkı oranı (%0.50) – düşük aktivatör dozajı (%0.1) optimizasyonları ile özetlenebilir.

3) 28 günlük numunelerde basınç dayanımı: Harç numunelerinde 28 günlük kür süresinin tamamlanması ile basınç dayanımları 17.26 – 22.34 MPa aralığında tespit edilmiştir. Şekil 3' de numunelerin gerilme – birim kısalma ilişkileri görülmektedir.



Şekil 3. 28 günlük numunelerde gerilme – birim kısalma ilişkisi.

Kalsiyum – silikat esaslı blok elemanları için yönetmelikler genellikle minimum 5 MPa basınç dayanımını talep edilmektedir [33]. Bu noktada elde edilen basınç dayanımlarının tamamı blok eleman üretimi için standartlardaki minimum dayanım kriterlerini karşılamaktadır. 28 günlük kontrol numunesinde 21.98 MPa'lık basınç dayanımı tespit edilmiştir. Karışımlara ilave edilen aerojel ve aktivatör içerikleri incelendiğinde 7 günlük kür süresi sonunda maksimum mekanik performans için önerilen düşük aerojel katkı oranı – yüksek aktivatör dozajı ve yüksek aerojel katkı oranı – düşük aktivatör dozajı optimizasyonlarının 28 günlük kür süresi sonunda da geçerli olduğu görülmektedir. Eşit aktivatör dozajı altında karışımlara ilave edilen %0.25 ve %0.50 katkı oranlarındaki silika aerojel içeriği sırasıyla K1 numunesine kıyasla K2 numunesinde %4.37'lik dayanım düşüşüne neden olurken K4 numunesinde ise %1.64'lük dayanım artışına olanak sağlamaktadır. Bu noktada eşit aktivatör dozajında artan aerojel katkısı ile elde edilen sonuçlar 7 günlük sonuçlar ile uyumludur. Benzer şekilde, yüksek aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde %22.73'lük ciddi düzeyde düşüşe sebep olurken düşük aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı K2 ve K3 numunelerinde benzer dayanımlara olanak sağlamaktadır. 28 günlük kür süresi saptanan dayanım sonuçları, kontrol numunesine kıyasla daha yüksek dayanımın sadece eşit aktivatör dozajında %0.50 aerojel katkı oranında elde edilebilmesi, artan aktivatör dozajının yüksek aerojel katkı oranında ciddi dayanım düşüşüne sebep olması açısından 7 günlük sonuçlar ile tam benzerlik göstermektedir.

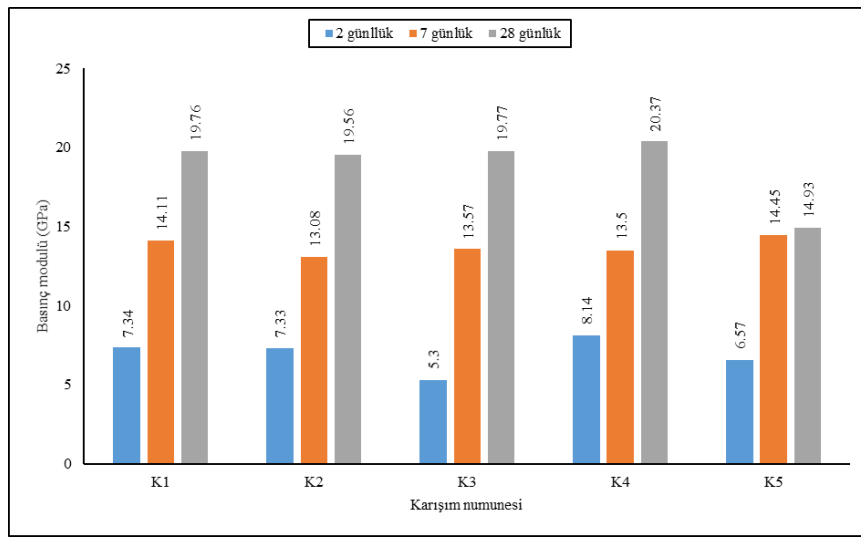
Numunelerin deformasyon davranışları incelendiğinde ise tüm numunelerde kontrol numunesine kıyasla kırılma anında daha yüksek deformasyon kapasiteleri saptanmıştır. Eşit aktivatör dozajı altında artana aerojel içeriği ile K1 numunesine kıyasla K2 ve K4 numunelerinde saptanan deformasyon kapasitesi gelişimi sırasıyla %5.55 ve %50 seviyelerindedir. Tespit edilen sonuçlar %0.25 aerojel katkı oranında kontrol numunesine kıyasla hiçbir kür süresi için daha düşük deformasyon yeteneğinin oluşmadığını ve ciddi düzeydeki deformasyon kapasite artışının hidrasyonun 7 ve 28 günlük periyotları arasında yaşandığını göstermektedir. Benzer şekilde, %0.50 aerojel katkı oranında kontrol numunesine kıyasla tüm kür süreleri için daima daha yüksek deformasyon yetenekleri saptanmıştır. Sonuçlar, alkali – aktive edilmiş uçucu kül harçlarında artan aktivatör dozajının olumlu etkisinin dayanım özelliklerine kıyasla deformasyon davranışını üzerinde daha etkili olduğunu vurgulamaktadır. Hidrasyonun 7. günü sonunda daha yüksek mekanik performansı işaret eden düşük aerojel katkı oranı – yüksek aktivatör dozajı ve yüksek aerojel katkı oranı – düşük aktivatör dozajı optimizasyonlarının hidrasyonun 28. günü itibarıyla kalıcı hale geldiği gözlemlenmiştir.

B. Basınç Modülü

Basınç modülleri, numunelerde lineer – elastik davranışın en net olarak gözlemlendiği maksimum gerilmenin % 10 – 40’ı aralığındaki gerilme- deformasyon bölgesi üzerinden aşağıda görülen eşitlik aracılığı ile hesaplanmıştır.

$$E = \Delta\sigma_{40-10} / \Delta\varepsilon_{40-10} \quad (1)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikte “E” basınç modülünü, “ $\Delta\sigma_{40-10}$ ” ve “ $\Delta\varepsilon_{40-10}$ ” değerleri ise basınç modülü için hesaplamının yapıldığı sırasıyla gerilme ve birim kısalma aralıklarını göstermektedir. Şekil 4’ de saptanan basınç modülleri görülmektedir.



Şekil 4. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde saptanan basınç modülleri.

2 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesinde 7.34 GPa’lık basınç modülü tespit edilmiştir. Karışımlara ilave edilen %0.25 katkı oranındaki aerojel içeriği, dayanım sonuçlarında tartışıldığı gibi 2 günlük kür süresi sonunda birim deformasyon davranışı üzerindeki nötr etkisi sebebiyle K2 numunesinde de 7.33 GPa’lık eşit kabul edilebilecek modül saptanmıştır. Eşit aktivatör dozajında artan aerojel katkısı ise K1 numunesine kıyasla K4 numunesinde %10.89’luk modül artışına olanak sağlamaktadır. Eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajının numunelerin deformasyon yeteneklerini arttırması neticesinde K2 numunesine kıyasla K3 ve K4 numunesine kıyasla K5 numunelerinde daha düşük modüller tespit edilmiştir.

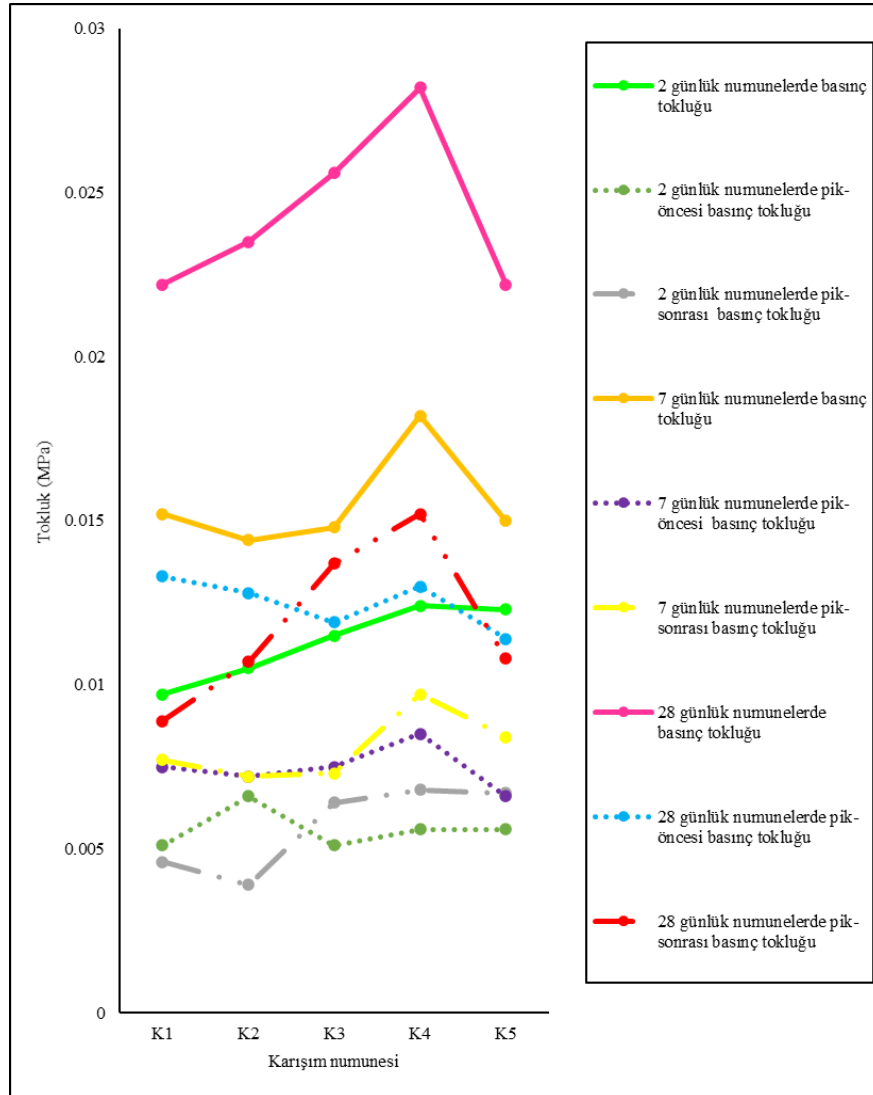
7 günlük numunelerde saptanan modül davranışı incelendiğinde, eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen aerojel içeriği daha düşük basınç modüllerine yol açmaktadır. Bununla birlikte eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı modül artışına neden olmaktadır. Özellikle %0.50 aerojel katkı oranında aktivatör dozajına olan hassasiyet artmakta ve maksimum basınç modülü kontrol numunesinin de üzerine çıkarak yüksek aerojel katkı oranı ve yüksek aktivatör dozajında tespit edilmektedir.

Atis ve Karahan [34] deneysel çalışmalarında uçucu kül harçlarında elastisite modülü üzerindeki değişimlerin dayanımdaki değişimlere kıyasla daha sınırlı seviyede olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak elde saptanan elastisite modüllerinin değişimi yukarıdaki tespit ile uyumludur. Hidratasyonun 28. günü itibariyle numunelerde saptanan basınç modülleri özellikle %0.25 aerojel katkı oranında birbirine yakındır. K2 ve K3 numunelerinde K1 kontrol numunesine kıyasla 19.56 – 19.77 GPa aralığında benzer modüller saptanmıştır. Eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen %0.50 katkı oranındaki aerojel içeriği ise basınç modülünün K4 numunesinde kontrol numunesinin üzerinde saptanmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte % 0.50 aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı ciddi düzeyde modül düşüşüne sebep olmakta ve hidratasyonun 7 ve 28 inci

günleri arasındaki süreçte K5 numunesi için modül artışı stabil hala gelmektedir. K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde kısmi oranda azalan deformasyon yeteneğine karşın ciddi düzeyde azalan dayanım özellikleri de bu duruma yol açmaktadır. Saptanan basınç modülleri, mekanik performans açısından önerilebilecek düşük aerojel katkı oranı – yüksek aktivatör dozajı ve yüksek aerojel katkı oranı – düşük aktivatör dozajı optimizasyonları ile uyumludur.

C. Basınç Tokluğu

2, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda saptanan basınç gerilmesi – birim deformasyon grafikleri aracılığıyla harç numunelerinin tokluk özellikleri basınç tokluğu, pik-öncesi basınç tokluğu ve pik-sonrası basınç tokluğu olmak üzere üç farklı periyottaki tokluk davranışı için ayrı ayrı saptanmıştır. Basınç tokluğu, gerilme – birim deformasyon grafiğinin altında kalan tüm alanın dikkate alınması ile hesaplanmıştır. Pik – öncesi ve pik – sonrası basınç toklukları ise sırasıyla başlangıç gerilmesi – maksimum gerilme ve maksimum gerilme – kırılma anındaki gerilme bölgelerinin altında kalan alanlar aracılığı saptanmıştır. Numunelerin tokluk kapasiteleri Şekil 5’ de sunulmuştur.



Şekil 5. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde saptanan tokluk kapasiteleri.

2 günlük kür süresi sonunda, kontrol numunesine kıyasla tüm numunelerde daha yüksek tokluk kapasiteleri saptanmıştır. K1 numunesine kıyasla eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen aerojel içeriği ile K2 ve K4 numunelerinde sırasıyla %8.24 ve %27.83 düzeylerinde tokluk artışları tespit edilmiştir. Özellikle %0.25'ten %0.50'e çıkan yüksek aerojel içeriğinde basınç tokluğu %18.09 düzeyinde gelişmektedir. Eşit aerojel içeriğinde artan aktivatör dozajı da düşük aerojel katkı oranında daha yüksek düzeyde tokluk gelişimine olanak sağlamaktadır. K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde artan aktivatör dozajı sayesinde %9.52 düzeyinde tokluk gelişimi saptanmıştır. 2 günlük basınç dayanımlarında tartışıldığı üzere; bu noktada artan aktivatör dozajı dayanım gelişmesine olanak sağlamıyorken esas fonksiyonu artan deformasyon kapasitesi aracılığı ile tokluk davranışı üzerinedir. Öte yandan, değişen aerojel katkı oranı ve aktivatör dozajının basınç tokluğu üzerindeki en önemli etkilerinden biri numunelerin maksimum basınç gerilmesi ile kırılma anı arasındaki süreçte gösterdikleri pik-sonrası tokluk davranışı üzerinedir. K1 kontrol numunesine kıyasla K3, K4 ve K5 numunelerinde sırasıyla %39.13, %47.82 ve %45.65 düzeylerinde pik-sonrası tokluk artışı saptanmıştır.

7 günlük kür süresi sonunda, hidrasyonun 2 ve 7 günlük periyotları arasındaki sürede aerojel katkılı numunelerde tespit edilen kısmi dayanım düşüşleri tokluk davranışı üzerindeki gelişimin de yavaşladığını işaret etmektedir. Bu sebeple, 2 günlük sonuçlardan farklı olarak K2, K3 ve K5 numunelerinde K1 numunesinden sırasıyla %5.26, %2.63 ve %1.31 düzeylerinde daha düşük tokluk kapasiteleri saptanmıştır. Ancak K4 numunesinde, 2 günlük kür süresinde olduğu gibi, K1 numunesinden daha yüksek düzeyde tokluk davranışı görülmektedir. Yüksek aerojel katkı oranı – düşük aktivatör dozajında elde edilen bu davranış, K1 numunesine kıyasla %19.73'lük tokluk iyileşmesini işaret etmektedir. Numunelerin pik – sonrası tokluk kapasiteleri incelendiğinde ise özellikle %0.50 aerojel katkı oranında davranışın oldukça geliştiği görülmektedir. K1 numunesine kıyasla K4 ve K5 numunelerinin pik-sonrası tokluk kapasiteleri sırasıyla %25.97 ve %9.09 düzeylerinde daha yüksektir.

28 günlük numunelerde saptanan basınç tokluğu ve pik-sonrası basınç tokluğu davranışı, alkali-aktifte edilmiş uçucu kül harçlarındaki değişen aerojel içeriği ve aktivatör dozajının önemini net olarak ortaya koymaktadır. Kontrol numunesine kıyasla tüm numunelerde daha yüksek tokluk ve pik – sonrası tokluk kapasiteleri saptanmıştır. Ancak, kapasite değişimi düşük dozajdaki aerojel ve aktivatör içeriğine kıyasla oldukça hassas tepki vermektedir. Eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen aerojel katkısı K1 numunesine kıyasla K2 ve K4 numunelerinde sırasıyla %5.85 ve %27.02 düzeylerinde basınç tokluk artışlarına olanak sağlamaktadır. K4 numunesinin, %0.50 aerojel katkı oranı ve düşük aktivatör dozajı ile tüm kür sürelerinde istikrarlı olarak kontrol numunesinden daha yüksek basınç tokluk kapasitesi sergilemesi oldukça dikkat çekicidir. Öte yandan; eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı sadece düşük aerojel katkı oranında tokluk kazancına yol açmaktadır. Bu sebeple K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde %8.93 düzeyinde daha yüksek tokluk kapasitesi saptanabilmektedir. Optimum aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajının C – S – H bağ oluşumunu artırma yeteneğinin mekanik özellikleri geliştirmesi beklenen bir durumdur [4]. Yüksek aerojel katkı oranında ise artan aktivatör dozajı, K4 numunesinde tespit edilen kazancı ortadan kaldırarak K1 ve K5 numunelerinde yaklaşık olarak benzer tokluk değerlerine neden olmaktadır.

Basınç tokluk kapasitelerinde, %27 gibi ciddi düzeylerde tokluk kazancı tespit edilmesine rağmen esas mekanik performansın arttığı nokta pik-sonrası basınç tokluğu davranışı ile alakalıdır. K1 numunesine kıyasla K2, K3, K4 ve K5 numunelerinde sırasıyla %20.22, %53.92, %70.78 ve %21.34 düzeylerinde pik-sonrası kapasite artışı kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tokluk kazançlarında tespit edilen artışların 3 katından daha fazlasının pik-sonrası basınç tokluğunda tespit edildiğini işaret etmektedir. Kontrol numunesi ile eşit düzeyde basınç tokluğu kapasitesine sahip olan K5 numunesinin %21.34 düzeyinde daha yüksek pik-sonrası tokluk performansı göstermesi dikkat çekicidir.

D. Cıva Porozimetresi Deneyi

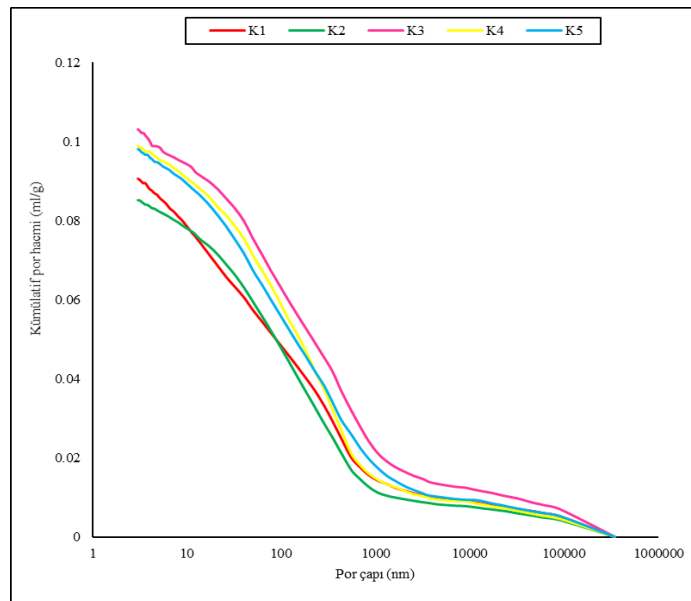
Cıva porozimetresi analizi ile çimento esaslı malzemelerde por yapısı özellikleri geniş bir perspektifte ortaya çıkarılabilmektedir. Analizden elde edilen kümülatif por hacmi – por çapı ilişkileri, spesifik por çapı aralığındaki değişimlerin incelenmesine de olanak tanımaktadır [35]. 28 günlük harç numunelerine uygulanan cıva porozimetresi deneyi sonucunda elde edilen por yapısı parametreleri aşağıda Tablo 5' de görülmektedir.

Tablo 5. Cıva porozimetresi deney sonuçları.

Karışım numunesi	Porozite (%)	Alansal-ortalama por çapı (nm)
K1	18.87	7.1
K2	17.58	8.7
K3	20.51	6
K4	19.79	8.4
K5	19.7	8.2

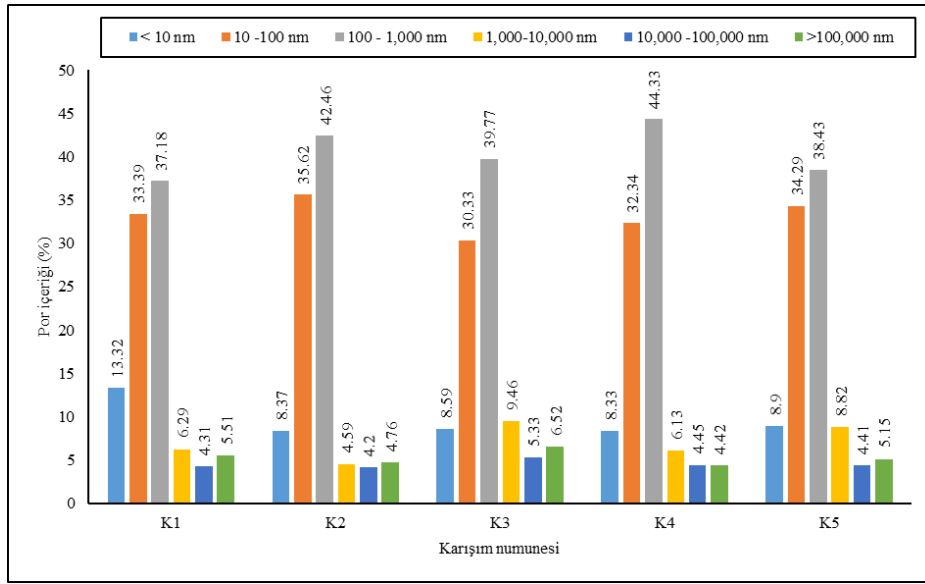
Nano-boyuttaki malzemelerin çimento matrisine dahil edilmesi, numunelerin por yapılarında cıva porozimetresi analizi ile tespit edilebilecek düzeyde belirgin değişiklikler yaratabilmektedir [36]. Kontrol numunesi K1' de %18.87'lik toplam porozite değeri tespit edilmiştir. Karışımlara eşit aktivatör dozajında ilave edilen aerojel katkısı K2 numunesinde toplam porozite değerini düşürücü etki yaratırken K4 numunesinde ise artan aerojel içeriği ile porozite artışı saptanmıştır. Öte yandan eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı ise %0.25 aerojel katkı oranında porozite artışına neden olurken %0.50 aerojel katkı oranında porozite düşürücü rol oynamaktadır. Bu noktada saptanan sonuçlar %0.25 ve %0.50 aerojel katkı oranlarında değişen aerojel ve aktivatör dozajlarının numunelerde farklı eğilimde değişebilen toplam porozite değerlerinin tespit edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Numunelerin por yapısı özellikleri ortalama por çapları açısından incelendiğinde ise daha keskin saptamalar ortaya çıkmaktadır. Karışımlara eşit aktivatör dozajında ilave edilen aerojel katkısı gerek K2 gerekse K4 numunelerinde ortalama por çaplarını genişletici bir etki yaratmaktadır. Silika aerojel partikülleri çimento matrisine dahil edildiği zaman partiküllerin matriste konumlandıkları bölgelerin etrafında zayıf adhezyondan dolayı boşlukların oluşması beklenen bir durumdur [30]. Bu sebeple K1 numunesine kıyasla K2 ve K4 numunelerinin alansal-ortalama por çaplarında sırasıyla %22.53 ve %18.3 düzeylerinde artışlar saptanmıştır. Bu durum, silika aerojel katkısı ile por çaplarının artan por hacmi sebebiyle genişleyebileceğini ortaya koyması açısından oldukça makuldür. Benzer şekilde, eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı ortalama por çaplarını tekrardan daraltan bir etki yaratmaktadır. Bağlayıcı malzeme içeriğinde bulunan uçucu külün artan aktivatör dozajı ile hidrolik aktivitesi artmakta ve düşük dozdaki aktivatör içeriğine kıyasla artan aktivatör dozajı ile ilave C-S-H bağı oluşmaktadır. Bu sebeple, eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı ile tespit edilen ortalama por çaplarındaki düşüş de oldukça makuldür. Burada elde edilen sonuçlar, geleneksel toplam porozite anlayışı ile por yapısı özelliklerinin değerlendirilmesinin yetersiz kaldığını ve ortalama por çapları ile daha sağlıklı değerlendirmelerin yapılabileceğini ortaya koymaktadır.



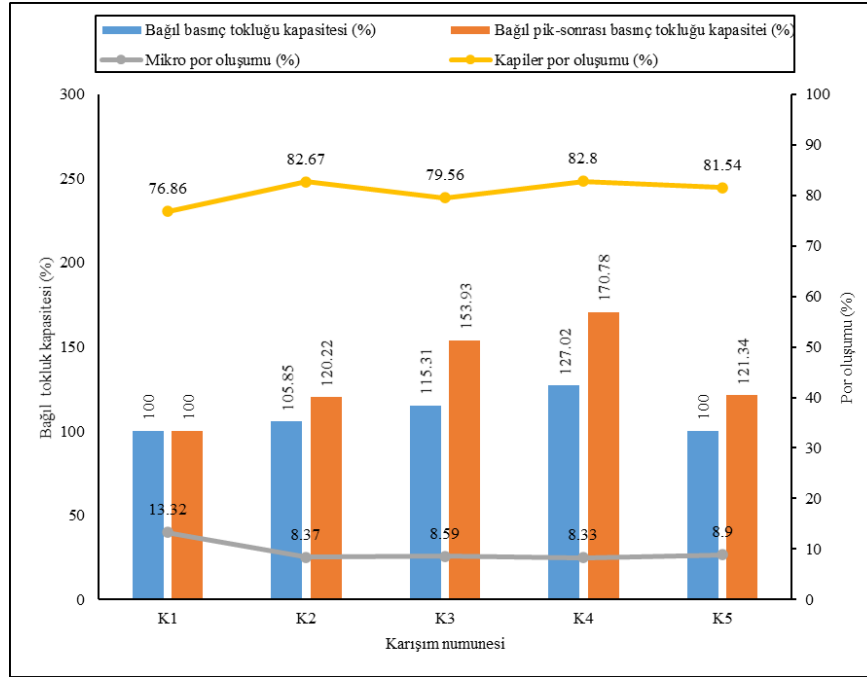
Şekil 6. Harç numunelerinde kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi.

Şekil 6’ da numunelere ait kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi görülmektedir. Birbirine çok yakın toplam porozite (%19.79 ve %19.7) ve alansal-ortalama por çaplarının (8.4 ve 8.2 nm) tespit edildiği %0.50 aerojel katkılı K4 ve K5 numuneleri tüm por çapı aralıkları boyunca birbirine oldukça yakın davranış sergilemektedir. Ancak düşük katkı oranında eşit aerojel içerikli K2 ve K3 numunelerinde gözlemlenen davranış K4 ve K5 numunelerindeki kadar birbirine yakın değildir. Bu durum, numunelerin ölçüm aralığı boyunca birbirine uzak olduğu kabul edilebilecek toplam porozite değerleri (%17.58 ve %20.51) ve alansal-ortalama por çapları (8.7 ve 6.0 nm) ile uyusmaktadır. K3 numunesi maksimum düzeyde tespit edilen toplam porozite değeri ile uyumlu olarak tüm por çap aralıkları boyunca grafiğin en üstünde kalacak şekilde en yüksek por hacmini sergilemektedir. K2 numunesi ise toplam porozite değerinin en yakın olduğu K1 kontrol numunesi ile 3-360,000 nm’ lik por çapı ölçüm aralığında spesifik por çapı aralıkları için kısmen daha düşük veya daha yüksek olacak şekilde geçişken por hacmi sergilemektedir. Bu noktada, detaylı bir değerlendirme için tüm numunelerde spesifik por çapı aralıklarındaki por hacimlerini esas alan por içeriklerinin dağılımının tespit edilmesi önem arz etmektedir.



Şekil 7. Harç numunelerinde por içeriklerinin dağılımı.

Şekil 7 ‘de mikro (<10 nm), kapiler (10-10,000 nm) ve makro (>10,000 nm) boyuttaki por içeriklerinin harç numunelerinin por yapısı içerisindeki dağılımı görülmektedir. Numunelerdeki por içeriklerinin dağılımı incelendiğinde, K1 kontrol numunesinde tespit edilen por içerikleri sırasıyla yaklaşık olarak %13 – %77 – %10 düzeninde mikro-kapiler -makro boyutta boşluklar içeren bir por yapısını işaret etmektedir. Bu düzendeki harç por yapısına dahil edilen silika aerojel katkısı, en belirgin değişikliği mikro düzeydeki çaplarda yaratmaktadır. Aerojel içermeyen K1 kontrol numunesinde %13.32 düzeyinde mikro çap oluşumu tespit edilirken aerojel içeren tüm numunelerde söz konusu çap oluşumu %9 seviyesinin altındadır. Bu durum karışımlarda partikül düzeyinde ortalama por hacmi 8-10 nm olan silika aerojelin kullanılması nedeniyle oldukça mantıklı gözükmektedir. Bir diğer önemli husus da aerojel içerikli numunelerde kontrol numunesine kıyasla azalan mikro por hacminin hangi yönde değişikliğe uğradığı noktasıdır. Kontrol numunesinde %76.86 düzeyinde tespit edilen kapiler por oluşumu, aerojel içeren numunelerde %79.56 – 82.8 aralığında saptanmıştır. Aerojel içeren tüm numunelerde özellikle 100 – 1,000 nm aralığındaki por oluşumu kontrol numunesinde tespit edilenin üzerinde seyretmektedir. Artan aktivatör dozajı, ilave bağ oluşumu ile bu por çapı aralığındaki por oluşumunu sınırlasa da yine de K3 ve K5 numunelerinde K1 numunesinde ölçülen düzeyin üzerinde por oluşumu saptanmaktadır. Özetle elde edilen por yapısı sonuçları, alkali-aktive edilmiş uçucu kül harçlarında karışımlara düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojelin numunelerin por yapısında mikro por oluşumunu azaltıcı ve kapiler por oluşumunu artırıcı yönde değişiklikler yarattığını göstermektedir.

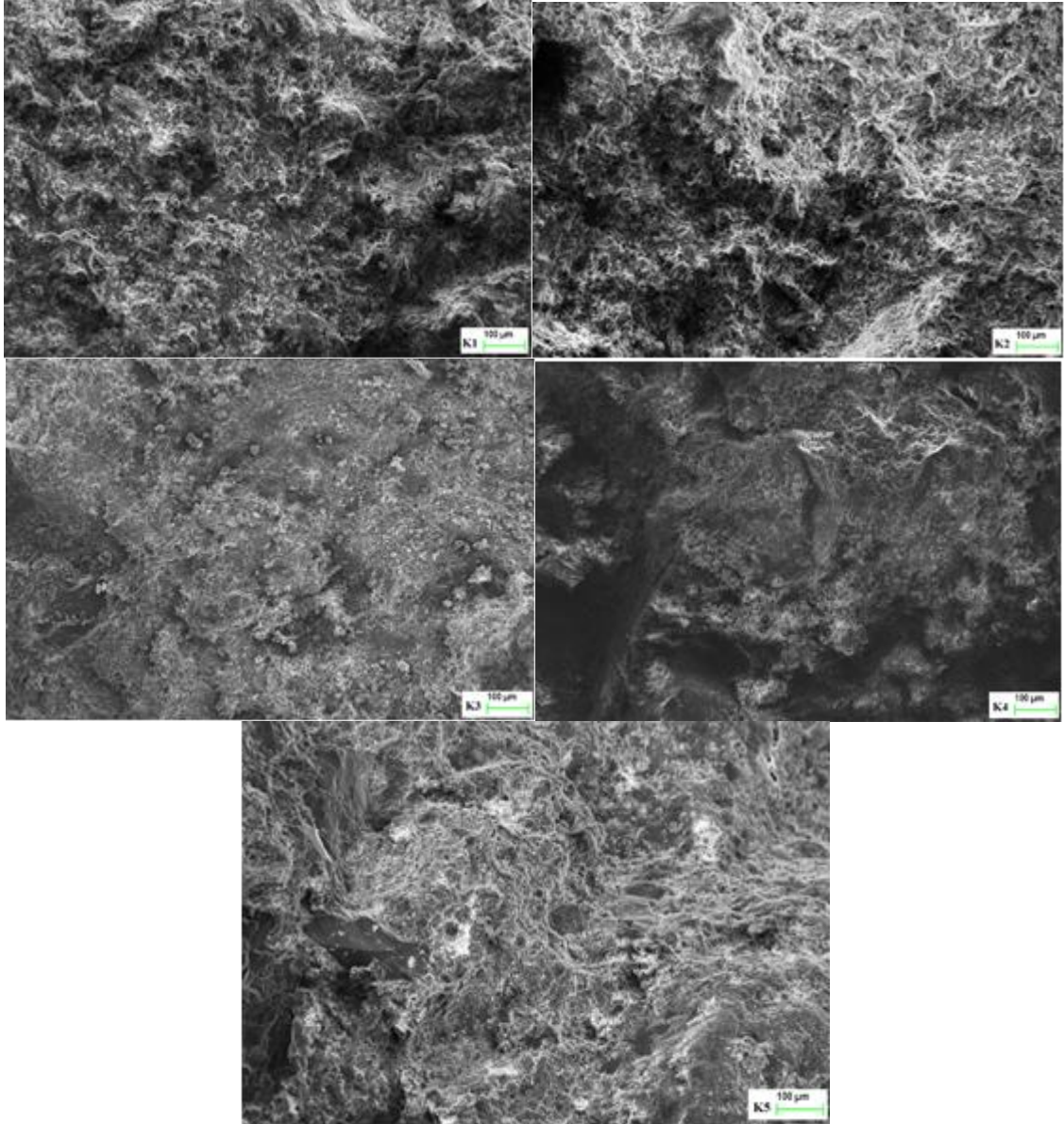


Şekil 8. Harç numunelerinde basınç tokluğu – por içerikleri ilişkisi.

Şekil 8’ de 28 günlük harç numunelerinde saptanan basınç tokluğu kapasiteleri ile numunelerdeki por yapısı özellikleri arasındaki ilişki görülmektedir. Grafikte K1 kontrol numunesinde saptanan basınç tokluğu ve pik – sonrası basınç tokluğu kapasiteleri %100 olarak kabul edilmiş ve değişen aerojel katkı oranı ve aktivatör dozajına bağlı olarak K2, K3, K4 ve K5 numunelerinin tokluk kapasiteleri K1 numunesine kıyasla bağlı olarak ifade edilmiştir. Basınç dayanımı test sonuçlarında tartışıldığı üzere, 28 günlük kür süresi sonunda yaklaşık 20 MPa basınç dayanımına sahip alkali- aktive edilmiş cüruf harçlarında, karışımlara düşük katkı oranları ve dozajlarda ilave edilen silika aerojel ve aktivatör esasen etkisini dayanım değerlerinde değil, kırılma anındaki deformasyon kapasiteleri ve tokluk özellikleri üzerine göstermektedir. Karışımlara çimento ağırlığınca dahil edilen aerojel ve aktivatör içerikleri, düşük aerojel katkılı (%0.25) ve yüksek aktivatör dozajlı (%0.2) harç numuneleri ile yüksek aerojel katkılı (%0.50) ve düşük aktivatör dozajlı (%0.1) numuneler için basınç tokluğu esaslı mekanik özellikleri maksimum verimlilikte geliştirmektedir. Elde edilen basınç tokluğu kazanımları numunelerin por yapısındaki değişen mikro ve kapiler düzeydeki geçişkenlik ile yakından alakalıdır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar Lee vd. [37] saptadığı sonuçlar ile uyumludur. Çimento esaslı malzemelerin por yapısında 5 – 10 nm por çapı aralığındaki düşüş alüminosilikat kökenli C–S–H bağ yapısını arttırmakta ve daha yüksek mekanik özelliklerin tespitine yol açabilmektedir. Öte yandan, basınç tokluğu açısından hiçbir değişikliğin saptanmadığı K5 numunesinde dahi düşük dozajdaki aerojel ve aktivatör içerikleri sayesinde pik – sonrası basınç tokluğu davranışı %20’nin üzerindeki bir seviyede gelişebilmektedir. Sonuçlar, ortalama 20 MPa basınç dayanımına sahip alkali – aktive edilmiş uçucu kül harçları için numunelerin basınç etkisi altındaki süneklik özelliklerinin silika aerojel katkısı ile ciddi düzeyde geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Silika aerojel katkısı sayesinde gelişen pik – sonrası basınç tokluğu özellikleri, numunelerin dayanım zorlamasına ulaştığı andan kırılma anına kadar geçen süredeki davranışı iyileştirmektedir. Geçişken mikro – kapiler düzeydeki por yapısı, kalsiyum – silikat yapısında zorlanan liflerin daha az zorlanan liflere gerilme aktarabilme özelliğini geliştirerek tokluk özelliklerini desteklemektedir.

E. SEM Analizi

Şekil 9' da 28 günlük numune parçalarının basınç dayanımı testinde kırılma yüzeylerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 9. Harç numunelerinin SEM görüntüleri.

Harç numunelerine ait mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, tüm numunelerde bağlayıcı malzeme içeriğinde %50 düzeyinde kullanılan uçucu kül içeriği nedeniyle küresel formda taneciklerin yer aldığı görülmektedir. Uçucu kül tanecikleri, hızla soğuma neticesinde diğer atık türü bağlayıcı partiküllerinden farklı olarak küresel formda oluşmaktadırlar [21]. Maksimum düzeyde küresel mikro yapı görüntüsü, diğer numunelere kıyasla K1 kontrol numunesinde görüntülenmiş olup artan aktivatör dozajının ve kısmen silika aerojel katkısının etkisiyle uygulanan alkali-aktivasyonun etkinliği morfolojik görüntü üzerine kısmen yansımıştır. Hidratasyon sürecinde, çimento matrisine dahil edilen silika arojellerin kimyasal reaksiyonlara inert yapıları nedeniyle

doğrudan dahil olmadıkları ancak matriste zayıf kenetlenmeleri sebebiyle por yapısını derinden etkileyebildikleri bilinmektedir [30]. Öte yandan, kalsiyum – silikat yapısının mikro yapı özellikleri ile por yapısı özellikleri arasında güçlü bir etkileşimin olduğu bilinen bir gerçektir [37]. Harç numunelerinde saptanan alansal-ortalama por çaplarının 6 – 8.4 nm aralığında olduğu dikkate alınırsa K1 numunesinde numunenin 7.1 nm' lik ortalama por çapına uygun sıklıkta bir çimento matrisi görülmektedir. K2 numunesinde ise K1 numunesine kıyasla artan ortalama por çapının izleri özellikle çapı 200,000 nm'e varan makro boşluk oluşumu ile görülmektedir. Porozimetre sonuçlarına göre, K3 numunesi tüm numuneler içinde 6 nm' lik ortalama por çapı ile en düşük ortalama por çapına sahip olan numunedir. Numunede tespit edilen por çapı bilgisine uygun olarak tüm numuneler arasındaki en sıkı çimento matrisi görüntüsü elde edilebilmiştir. K4 ve K5 numunelerinde ise ortalama por çapları ile uyumlu olarak K5 numunesinde K4'e kıyasla daha yoğun bir matris gözlemlenmektedir.

IV.SONUÇLAR

Bu çalışmada alkali-aktive edilmiş uçucu kül harç karışımlarına düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısının ve aktivatör dozajının numunelerin mekanik, por yapısı ve mikro yapı özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan aşağıdaki önemli sonuçlar elde edilmiştir:

- Yaklaşık 20 MPa düzeyinde basınç dayanımına sahip uçucu kül harçlarında karışımlara çimento ağırlığınca düşük katkı oranlarında ilave edilen silika arojeller, harç por yapısında performans açısından mekanik özelliklere katkı sunabilen nitelikli hava boşlukları olarak katkı sunabilmektedirler.
- Kalsiyum – silikat yapısına ilave edilen silika arojeller, zorlanan kalsiyum-silikat liflerinin daha az zorlanan liflere gerilme aktarabilme özelliğini geliştirebilmektedir.
- Karışımlardaki silika aerojel içeriği ve artan aktivatör dozajı, numunelerin dayanım değerlerine kıyasla deformasyon davranışlarına etki etmektedir. Bu sebeple 28 günlük kür süresi sonunda %0.25 aerojel katkılı numunelerde kırılma anındaki deformasyonlar %50 seviyesinde artabilmektedir.
- Harç karışımlarına ilave edilen düşük katkı oranlarındaki silika aerojel katkısı sayesinde harç numunelerinin basınç etkisi altındaki tokluk kapasiteleri 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri için sırasıyla %29.4, %13.3 ve %27 seviyelerinde artabilmektedir.
- Silika aerojel içeriğinin numunelerin mekanik performansı üzerindeki baskın etkisi, basınç tokluğu özelliklerinden çok pik-sonrası basınç tokluğu davranışı ile alakalıdır. Bu sayede harç numunelerinde 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri için sırasıyla %47.82, %26.97 ve %70.78 düzeylerinde pik-sonrası basınç tokluğu gelişimleri saptanmıştır.
- Silika aerojel katkısı harç por yapısındaki mikro çap düzeyini azaltarak kapiler çap oluşumunu arttırmaktadır. Tüm katkılı numunelerde %13 düzeyinden %9 seviyesinin altına inen mikro çap oluşumu tokluk gelişimine katkı sunmaktadır.
- Düşük aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı mekanik özellikleri geliştirirken yüksek aerojel katkı oranında düşük aktivatör dozajı optimum mekanik performans için tercih edilmelidir.

Son yıllarda kalsiyum – silikat esaslı yapı elemanlarının üretimine yönelik çabalar tüm endüstrilerde olduğu gibi malzeme alanında da sürdürülebilirlik politikalarını esas almaktadır. Uçucu kül harçları, kalsiyum – silikat yapısı ile olan adaptasyonları ve mevcut potansiyelleri göz önünde bulundurularak sıkça deneysel çalışmalarda konu edilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, düşük miktardaki silika aerojel katkısının ortalama 20 MPa tasarım basınç dayanımına sahip alkali-aktive edilmiş uçucu kül harçlarının deformasyon yeteneklerini ciddi düzeyde arttırabildiğini işaret etmektedir. Silika arojeller aracılığı ile elde edilen tokluk kazancı, blok eleman üretimi için silika aerojel katkısını esas alan yenilikçi bir tasarım anlayışını teşvik edici niteliktedir.

KAYNAKLAR

- [1] Karahan, O. (2017). *Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature*, Construction and Building Materials, 152, 898–906.
- [2] Hwang, C.-L., Huynh, T.-P. (2015). *Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks*, Construction and Building Materials, 93, 335–341.
- [3] Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A. E. M., Aboshama, A.Y. (2016). *Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete*, Construction and Building Materials, 124, 866–877.
- [4] Bostanci, L., Sola, O.C. (2018). *Mechanical properties and thermal conductivity of aerogel incorporated alkali-activated slag mortars*, Advances in Civil Engineering, 2018, 1 – 9.
- [5] Zuo, Y., Nedeljković, M., Ye, G. (2019). *Pore solution composition of alkali-activated slag/fly ash pastes*, Cement and Concrete Research, 115, 230–250.
- [6] Provis, J.L., Bernal, S.A., (2014). *Geopolymers and related alkali-activated materials*, Annual Review of Materials Research, 44, 299–327.
- [7] ASTM C618-01, (2001). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*. American Society for Testing and Materials.
- [8] Bankowski, P., Zou, L., Hodges, R. (2004). *Reduction of metal leaching in brown coal fly ash using geopolymers*, Journal of Hazardous Materials. 114, 59–67.
- [9] Antiohos, S.K., Tsimas, S. (2007). *A novel way to upgrade the coarse part of a high calcium fly ash for reuse into cement systems*, Waste Management, 27, 675–683.
- [10] Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., Wang, H. (2016). *Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications*, Journal of Cleaner Production, 125, 253–267.
- [11] Kaur, M., Singh, J., Kaur, M. (2018). *Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin*, Construction and Building Materials, 190, 672–679.
- [12] Akçaozoglular, S., Atis, C.D. (2011). *Effect of Granulated Blast Furnace Slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates*, Construction and Building Materials, 25, 4052–4058.
- [13] Karahan, O., Atis, C. D. (2011). *The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete*, Materials and Design, 32, 1044–1049.
- [14] Yerremala, A., Chandurdu, R., Desai, B. (2012). *Influence Of Fly Ash Replacement On Strength Properties Of Cement Mortar*, International Journal of Engineering Science and Technology, 4, 3657–3665.
- [15] Al Zaidi, A.K.A., Demirel, B., Atis, C. D. (2019). *Effect of different storage methods on thermal and mechanical properties of mortar containing aerogel, fly ash and nano-silica*, Construction and Building Materials, 199, 501–507.
- [16] Farina, I., Modano, M., Zuccaro, G., Goodall, R., Colangelo, F. (2018). *Improving flexural strength and toughness of geopolymer mortars through additively manufactured metallic rebars*, Composites Part B, 145, 155–161.
- [17] Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., Mesbah, H. A., Hossain, K. M. A. (2018). *Use of recycled glass powder to improve the performance properties of high volume fly ash-engineered cementitious composites*, Construction and Building Materials, 163, 53–62.

- [18] Guades, E.J. (2016). *Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymers mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio*, Construction and Building Materials, 127, 484–493.
- [19] Xu, F., Deng, X., Peng, C., Zhu, J., Chen, J. (2017). *Mix design and flexural toughness of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer composites*, Construction and Building Materials, 150, 179–189.
- [20] Morsy, M. S., Shoukry, H., Mokhtar, M. M., Ali, A. M., El-Khodary, S. A. (2018). *Facile production of nano-scale metakaolin: An investigation into its effect on compressive strength, pore structure and microstructural characteristics of mortar*, Construction and Building Materials, 172, 243–250.
- [21] X. Wu, M. Fan, J. F. Mclaughlin, X. Shen, G. Tan, A novel low-cost method of silica aerogel fabrication using fly ash and trona ore with ambient pressure drying technique, Powder Technology 323 (2018) 310–322.
- [22] Ibrahim, M., Biwole, P. H., Wurtz, E., Achard, P. (2014). *A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating*, Building and Environment, 81, 112-122.
- [23] Hanif, A., Diao, S., Lu, Z., Fan, T., Li, Z. (2016). *Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres – Mechanical and thermal insulating properties*, Construction and Building Materials, 116, 422–430.
- [24] Liu, Z.-h., Ding, Y.-d., Wang, F., Deng, Z.-p. (2016). *Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel*, Construction and Building Materials, 122, 548–555.
- [25] Garrido, R., Silvestre, J. D., Flores-Colen, I. (2017). *Economic and Energy Life Cycle Assessment of aerogel-based thermal renders*, Journal of Cleaner Production, 151, 537-545.
- [26] Bostanci, L., Ustundag, O., Sola, O.C., Uysal, M. (2019). *Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties*, Gradevinar, 71, 651– 661.
- [27] Cuce, E., Cuce, P.M., Wood, C.J., Riffat, S.B. (2014). *Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings*, Construction and Building Materials, 77, 28–39.
- [28] Westgate, P., Paine, K., Ball, R. J. (2018). *Physical and mechanical properties of plasters incorporating aerogel granules and polypropylene monofilament fibres*, Construction and Building Materials, 158, 472–480.
- [29] Haranath, D. (1196). *Aerogel the lightest solid known*, Resonance, 64-68.
- [30] Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I. C., Gao, T., Wallevik, Ó. H. (2015). *Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete*, Construction and Building Materials, 77, 307–316.
- [31] TS EN 196-1, (2016). *Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [32] TS EN 1015-11, (2000). *Kağır harcı- Deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [33] TS EN 771-2, (2015). *Kâğır birimler- Özellikler- Bölüm 2: Kireç kumtaşı kâğır birimler*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [34] Atis, C. D., Karahan, O. (2009). *Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete*, Construction and Building Materials, 23, 392–399.

- [35] Zeng, Q.,Mao, T.,Li, H.,Peng, Y. ,(2018).*Thermally insulating lightweight cement-based composites incorporating glass beads and nano-silica aerogels for sustainably energy-saving buildings*, Energy & Buildings, 174, 97–110.
- [36] Oltulu, M.,Sahin, R. (2014).*Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders*, Construction and Building Materials, 53, 658–664.
- [37] Lee, N.K.,Koh, K.T.,An, G.H.,Ryu, G.S. (2017).*Influence of binder composition on the gel structure in alkali activated fly ash/slag pastes exposed to elevated temperatures*, Ceramics International, 43, 2471–2480.

Araştırma Makalesi - Research Article

Onkolitik Virüs ile Matematiksel Tümör Modeli

Tuğba Akman Yıldız^{1*}

Geliş / Received: 23/07/2019

Revize / Revised: 15/10/2020

Kabul / Accepted: 09/11/2020

ÖZ

Besin, sağlıklı hücreler, tümör hücreleri ve onkolitik virüs arasındaki etkileşim için verilen dört boyutlu matematiksel model [29], bu çalışmada beş boyutlu adi diferansiyel denklem sistemi şeklinde genişletilmiştir. Tümör hücreleri onkolitik virüs ile etkileşime geçtiğinden, enfekte olmuş tümör hücreleri de modele dâhil edilmiştir. Onkolitik virüsün tümörü yok etmedeki rolünü incelemek için, tümörün sistemde olmadığı durumlar için kararlılık analizi yapılmıştır. Tümör ve sağlıklı hücrelerden yoksun bir sistemin kararlılığının, sisteme verilen virüs dozunun minimum değerine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Tümörün olmadığı ve sağlıklı hücrelerin var olduğu durumda ise, sistemin kararlılığı için elde edilen minimum virüs dozunun, bir önceki dozdan daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, sistemde sağlıklı hücrelerin bulunmasının, tümörün yok edilme şansını artırdığı ve gerekli ilaç dozunun azaltılmasını sağladığı sonucuna varılmıştır. Son olarak, elde edilen kararlılık analizi için nümerik sonuçlar elde edilmiş ve sistemin kararlılığı için örnekler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler- *Tümör Modeli, Kararlılık Analizi, Onkolitik Virüs, Viroterapi*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: takman@thk.edu.tr (<http://orcid.org/0000-0003-1206-2287>)

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Turkish Aeronautical Association, 06790, Ankara, Turkey

A Mathematical Tumor Model with Oncolytic Virus

ABSTRACT

In this study, a four-dimensional model [29] that is given for interactions between nutrient, healthy cells, tumor cells, and oncolytic virus, is extended with a five-dimensional ordinary differential equations system. Infected tumor cells are included in the model since oncolytic virus infects tumor cells. In order to investigate the role of oncolytic virus in eradication of tumor burden, stability analysis has been performed in case of no tumor cells in the system. It is determined that the stability of the system in case of no tumor cells and healthy cells is related with the minimum virus dosage injected into the host. In case of no tumor cells, but healthy cells, the minimum dosage is smaller than the previous case for stability of the equilibrium point. Therefore, this study demonstrates that existence of healthy cells in the host increases the chance of eradication of tumor cells, and it leads to a decrease in virus dosage. Finally, some numerical results have been obtained for the stability analysis and numerical findings have been presented.

Keywords- *Tumor Model, Stability Analysis, Oncolytic Virus, Virotherapy.*

I. INTRODUCTION

Cancer is a disease where some of the cells within the body divide continuously due to mutation in genes and they form tumor [1]. Some cancer cells can be eradicated by immune system [2]; but some of them may escape from immune system, and then the disease becomes harder to control [3, 4]. On the other hand, the disease has still been a threat and 18.1 million new cancer cases were estimated in 2018 [5]. However, there is an increase in cancer survivors due to clinical/medical improvements [6]. As classical treatment strategies, chemotherapy [7], immunotherapy [8], radiotherapy [9] and surgery [10] can be mentioned and the choice of the appropriate treatment depends on type and stage of the disease. Need for more successful treatment strategies to eliminate tumor forces scientists to invent new therapies such as targeted chemotherapy [11] and oncolytic virotherapy [12].

Laboratory experiments to test the success of a particular treatment can be expensive and time consuming. Instead, mathematical models are easy to use, and they can be solved quickly for different values of parameters which represent different circumstances or hosts. Therefore, dynamical models have gained interest for a while and different models have been presented in the literature. For example, CTL response is modeled with a five-dimensional system [13]. On the other hand, some simple models are constructed in the work, [14] and they are validated with the real data. De Pillis et al. propose a mathematical model for tumor-immune interaction with natural killer cells and CD8+ T cells [15], whereas tumor and lymphocyte interactions are modeled by Webb et al. [16]. Effect of IL-6 to cancer survival is investigated in the work [17], while a new model including search time for immune system to attack tumor cells is included in another study by Wei [18]. A more general model is constructed by incorporating different immune cells in the study [19]. As examples to treatment strategies, we can mention the study of De Pillis et al. [20] where immunotherapy and chemotherapy are combined. On the other hand, drug resistance is investigated in case of metronomic chemotherapy [21] as another challenge for cancer treatment.

The studies mentioned above take tumor and immune cells into account. However, oncolytic virotherapy, where some engineered viruses are injected into the host to boost the immune system, has gained interest for a while [22]. From the mathematical point of view, we can mention two of the pioneer works [23, 24] where dynamics of uninfected and infected tumor cells and virus are modeled. An extended model with anti-tumor and anti-virus immune response is presented by Wodarz [25]. Furthermore, another model [26] where a five-dimensional model is constructed with susceptible/infected healthy/tumor cells together with the virus, whereas the effect of M1 and M2 macrophages are investigated by Eftimie [27]. Indeed, a seven-dimensional model is proposed including healthy cells, tumor cells, immune response and viruses in the recent work of Mahasa et al. [28]. As a different point of view, nutrient is included in the work [29] and contribution of M1 virus is investigated to eradicate tumor burden.

In this current work, we extend the model given in the study [Eq. (1.1), 29]. In the work of Wang et al. [29], a dynamical model is constructed based on the experimental findings in the study [30] to test the role of oncolytic virus M1. The model in the study [29] assumes that healthy (normal) cells $N(t)$ and tumor cells $T(t)$ increase due to interaction with nutrients $S(t)$ where concentration of nutrition and the virus $V(t)$ increase by a constant source term. Moreover, interaction of tumor cells with the virus contributes to virus population. All unknown functions decay due to washout rate and the cells are subject to natural death. For reader to follow the idea easily, we mention the model in the study of Wang et al. [29]. We extend this model by including infected tumor cells $I(t)$ and logistic growth term is used for normal cells as done in the work of De Pillis and Radunskaya [31]. Afterwards, we investigate the effect of oncolytic virus and minimum virus dosage in case of logistics growth rate of normal cells and infected tumor cells in the model by presenting stability analysis of tumor free equilibrium point(s). The rest of the study is organized as follows: In Sec. II, we discuss the construction of the new model. In Sec.III, we perform the stability analysis of tumor free equilibrium point. Then, numerical results are presented in Sec.IV. The study ends with summary and conclusion.

II. MATHEMATICAL MODEL

In this section, we construct a new mathematical model motivated by the study [29] to investigate the impact of oncolytic virus to eradicate tumor cells in the host. The model consists of five components, namely concentration of nutrient $S(t)$, concentration of healthy (normal) cells $N(t)$, concentration of uninfected and

infected tumor cells $T(t), I(t)$, respectively. The last component is concentration of virus $V(t)$. Nutrient is supplied to the system at a rate of f and tumor cells use it to replicate themselves, whereas nutrient diminishes at a rate of d . For normal cells, we use logistics growth [31] and they decay due to natural death and washout. Tumor cells are split into two parts as uninfected and infected tumor cells, where they use nutrient to replicate. After interaction of tumor cells with virus, some of them are transferred to the class of infected tumor cells. On the other hand, tumor cells and normal cells compete with each other. Infected tumor cells are produced as mentioned before. Concentration of virus is increased by injected medication and infected tumor cells, while it decays due to interaction with tumor cells. Indeed, concentrations of tumor cells and virus decrease due to natural death and washout. When we express these relations as a dynamical system, then we reach the mathematical model in Eq.(1)-(6) where all parameters are non-negative.

$$\frac{dS(t)}{dt} = f - a_2S(t)T(t) - a_4S(t)I(t) - \mu S(t), \quad (1)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = r_1N(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K}\right) - (\mu + e_1)N(t), \quad (2)$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = r_2a_2S(t)T(t) - a_3T(t)V(t) - a_5T(t)N(t) - (\mu + e_2)T(t), \quad (3)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = r_3a_3T(t)V(t) + r_4a_4S(t)I(t) - (\mu + e_3)I(t), \quad (4)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = g + \alpha I(t) - a_3T(t)V(t) - (\mu + e_4)V(t), \quad (5)$$

$$S(0) = S_0, N(0) = N_0, T(0) = T_0, I(0) = I_0, V(0) = V_0. \quad (6)$$

III. STABILITY ANALYSIS

We present stability analysis for the model (1)-(6) to test the contribution of M1 virus to eliminate tumor cells. Before doing this, as suggested in the study [29], we consider a reduced model for S, N, T by eliminating M1 virus and infected tumor cells.

A. Dynamics of S, N and T cells

We consider the model consisting of nutrient S , healthy cells N and uninfected tumor cells T as

$$\frac{dS(t)}{dt} = f - a_2S(t)T(t) - \mu S(t), \quad (7)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = r_1N(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K}\right) - (\mu + e_1)N(t), \quad (8)$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = r_2a_2S(t)T(t) - a_5T(t)N(t) - (\mu + e_2)T(t), \quad (9)$$

$$S(0) = S_0, N(0) = N_0, T(0) = T_0. \quad (10)$$

The idea behind finding equilibrium points is to determine all possible solutions of the equations

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0 = \frac{dN(t)}{dt} = \frac{dT(t)}{dt}. \quad (11)$$

We find the equilibrium points where tumor cells or normal (healthy) cells are extinct. Firstly, we take the right hand side of the Eq. (8) into $N(t)$ paranthesis and rewrite it as $N(t) \left(r_1 - \frac{r_1 N(t)}{K} - (\mu + e_1) \right) = 0$. and then the solutions are given as $\bar{N}(t) = 0$ or $\bar{N}(t) = \frac{K(r_1 - \mu - e_1)}{r_1} = \frac{K(\mu + e_1)}{r_1} (B_1 - 1)$ if $B_1 := \frac{r_1}{\mu + e_1} > 1$.

- If $\bar{N}(t) = 0$, then Eq. (9) becomes $T(t)(r_2 a_2 S(t) - (\mu + e_2)) = 0$. It leads to two solutions as $\bar{T}(t) = 0$ or $\bar{S}(t) = \frac{\mu + e_2}{r_2 a_2}$. Then, we obtain two equilibrium points as $E_0 = \left(\frac{f}{\mu}, 0, 0\right)$ and $E_1 = \left(\frac{\mu + e_2}{r_2 a_2}, 0, \frac{f r_2 a_2 - \mu(\mu + e_2)}{a_2(\mu + e_2)}\right) = \left(\frac{\mu + e_2}{r_2 a_2}, 0, \frac{\mu}{a_2}(B_2 - 1)\right)$ where $B_2 := \frac{f r_2 a_2}{\mu(\mu + e_2)}$. Here, for E_1 to be feasible, $B_2 > 1$ must hold.
- If $\bar{T}(t) = 0$, then Eq. (7) gives $\bar{S}(t) = \frac{f}{\mu}$. Then, we obtain an equilibrium point as

$$E_2 = \left(\frac{f}{\mu}, \frac{K(r_1 - \mu - e_1)}{r_1}, 0\right) = \left(\frac{f}{\mu}, \frac{K(\mu + e_1)}{r_1}(B_1 - 1), 0\right). \text{ Similarly, for a feasible equilibrium point, } B_1 > 1 \text{ must be satisfied.}$$

Here, we note that there are other equilibrium points where tumor cells and/or normal cells coexist; but, we restrict ourselves to these cases to observe the contribution of oncolytic virus to eradication of tumor cells. Since the equilibrium point E_0 corresponds to the case where there is only nutrient within the host, we don't investigate this equilibrium point. Instead, we proceed with the stability analysis of E_1 and E_2 .

Equilibrium point E_1 : We obtain the Jacobian of the model (7)-(9) and evaluate it at E_1 to obtain the matrix

$$J(E_1) = \begin{pmatrix} -\mu B_2 & 0 & \frac{-(\mu + e_2)}{r_2} \\ 0 & (\mu + e_1)(B_1 - 1) & 0 \\ r_2 \mu (B_2 - 1) & \frac{-a_5 \mu}{a_2}(B_2 - 1) & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

We immediately see that one of the eigenvalues of the matrix (3) is $\lambda_1 = (\mu + e_1)(B_1 - 1)$ and it is negative if $B_1 < 1$. To find the other eigenvalues, we obtain the characteristics equation of the matrix in (12) as

$$p(\lambda) = (\lambda - ((\mu + e_1)(B_1 - 1)))(\lambda^2 + \mu B_2 \lambda + \mu(\mu + e_2)(B_2 - 1)).$$

For other eigenvalues to be negative, the term $\mu(\mu + e_2)(B_2 - 1)$ must be positive, since $\mu B_2 > 0$. Then, we get the condition $B_2 > 1$ for stability. We conclude that E_1 is stable if both $B_1 < 1$ and $B_2 > 1$ hold. We summarize the result as a theorem below.

Theorem 1: The equilibrium point E_1 exists if $B_2 > 1$. Indeed, it is locally asymptotically stable if $B_1 < 1$ and $B_2 > 1$ hold.

Equilibrium point E_2 : We consider the Jacobian of the model (7)-(9) and evaluate it at E_2 to obtain the matrix

$$J(E_2) = \begin{pmatrix} -\mu & 0 & \frac{-a_2 f}{\mu} \\ 0 & -(\mu + e_1)(B_1 - 1) & 0 \\ 0 & 0 & (\mu + e_2)(B_2 - 1) - a_5 K \frac{\mu + e_1}{r_1}(B_1 - 1) \end{pmatrix} \quad (13)$$

Eigenvalues of the matrix in Eq. (13) are given by the entries on the diagonal as $\lambda_1 = -\mu$, $\lambda_2 = -(\mu + e_1)(B_1 - 1)$ and $\lambda_3 = (\mu + e_2)(B_2 - 1) - a_5 K \frac{\mu + e_1}{r_1}(B_1 - 1)$. For λ_2 to be negative, we find that $B_1 > 1$, which is the condition to reach a feasible equilibrium point. For $\lambda_3 < 0$, we find that $B_2 < \frac{K a_5 (\mu + e_1)}{r_1 (\mu + e_2)}(B_1 - 1) + 1$ must hold. Now, we summarize the result below.

Theorem 2: The equilibrium point E_2 exists if $B_1 > 1$. Indeed, it is locally asymptotically stable if $B_1 > 1$ and $B_2 < \frac{K a_5 (\mu + e_1)}{r_1 (\mu + e_2)}(B_1 - 1) + 1$ hold.

The model (7)-(9) is not symmetric in T and N due to the competition between tumor and normal cells, namely the term a_5TN . It leads to unsymmetric conditions for stability of the equilibrium points E_1 and E_2 . Indeed, the extra term in the upper bound of B_2 in Thm.2 is on account of this unsymmetric model.

A. Dynamics of the new model

We proceed with the new model in Eq. (1)-(5). We restrict ourselves to the case where tumor cells are extinct and we find tumor-free equilibrium point. Indeed, we take $T = I = 0$ in Eq. (1) and proceed. From Eq. (2), we get two solutions as $\bar{N}(t) = 0$ or $\bar{N}(t) = \frac{K(r_1 - \mu - e_1)}{r_1} = \frac{K(\mu + e_1)}{r_1}(B_1 - 1)$ if $B_1 := \frac{r_1}{\mu + e_1} > 1$. Indeed,

- From Eq. (1), we have $\bar{S} = \frac{f}{\mu}$.
- From Eq. (5), we find $\bar{V} = \frac{g}{\mu + e_4}$.
- If $\bar{N}(t) = 0$, then we find the equilibrium point as $E_3 = \left(\frac{f}{\mu}, 0, 0, 0, \frac{g}{\mu + e_4}\right)$.
- If $\bar{N}(t) = \frac{K(\mu + e_1)}{r_1}(B_1 - 1)$, then we reach $E_4 = \left(\frac{f}{\mu}, \frac{K(\mu + e_1)}{r_1}(B_1 - 1), 0, 0, \frac{g}{\mu + e_4}\right)$.

We proceed with the stability of E_3 and E_4 .

Equilibrium point E_3 : The Jacobian of the model (1)-(5) is evaluated at E_3 to obtain the matrix

$$J(E_3) = \begin{pmatrix} -\mu & 0 & \frac{-a_2f}{\mu} & \frac{-a_4f}{\mu} & 0 \\ 0 & (\mu + e_1)(B_1 - 1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\mu + e_2)(B_2 - 1) - \frac{ga_3}{\mu + e_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_3a_3g}{\mu + e_4} & (\mu + e_3)(B_3 - 1) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-a_3g}{\mu + e_4} & \alpha & -(\mu + e_4) \end{pmatrix} \quad (14)$$

The eigenvalues of this block diagonal matrix in Eq. (14) are given by $\lambda_1 = -\mu$, $\lambda_2 = (\mu + e_1)(B_1 - 1)$, $\lambda_3 = (\mu + e_2)(B_2 - 1) - \frac{ga_3}{\mu + e_4}$, $\lambda_4 = (\mu + e_3)(B_3 - 1)$, $\lambda_5 = -(\mu + e_4)$ where $B_3 := \frac{r_4a_4f}{\mu(\mu + e_3)}$. For stability, the second eigenvalue leads to the condition $B_1 < 1$, whereas the third eigenvalue gives the condition that $\lambda_3 < 0$ which leads to $B_2 < \frac{ga_3}{(\mu + e_2)(\mu + e_4)} + 1$. Rewriting this condition, we find a threshold value for the virus source injected into the host, namely g , as $g_0 = \frac{(\mu + e_2)(\mu + e_4)}{a_3}(B_2 - 1) < g$. It must be noted that the recruitment rate of the virus cannot be negative, so $g_0 \geq 0$ must hold. This leads to another condition $B_2 \geq 1$. If the term g is smaller than g_0 , then E_3 is unstable. This result is written as follows:

Theorem 3: The equilibrium point E_3 is locally asymptotically stable if $g_0 = \frac{(\mu + e_2)(\mu + e_4)}{a_3}(B_2 - 1) < g$ holds together with $B_1 < 1, B_3 < 1$ and $B_2 \geq 1$.

Equilibrium point E_4 : The Jacobian of the model (1)-(5) is evaluated at E_4 to obtain the matrix

$$J(E_4) = \begin{pmatrix} -\mu & 0 & \frac{-a_2f}{\mu} & \frac{-a_4f}{\mu} & 0 \\ 0 & -(\mu + e_1)(B_1 - 1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_3a_3g}{\mu + e_4} & (\mu + e_3)(B_3 - 1) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-a_3g}{\mu + e_4} & \alpha & -(\mu + e_4) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

where $\Omega = (\mu + e_2)(B_2 - 1) - \frac{ga_3}{\mu + e_4} - \frac{Ka_5(\mu + e_1)}{r_1}(B_1 - 1)$. Similarly, the entries on the main diagonal are the eigenvalues of this block diagonal matrix and they are $\lambda_1 = -\mu$, $\lambda_2 = -(\mu + e_1)(B_1 - 1)$, $\lambda_3 = \Omega$, $\lambda_4 = (\mu + e_3)(B_3 - 1)$ and $\lambda_5 = -(\mu + e_4)$. For stability, we obtain that $B_1 > 1, \Omega < 0$ and $B_3 < 1$ must hold. The second condition gives us the following relation: $B_2 < \frac{ga_3}{(\mu + e_2)(\mu + e_4)} + \frac{Ka_5(\mu + e_1)}{r_1(\mu + e_2)}(B_1 - 1) + 1$. Indeed, we find a condition on the minimum virus source as $0 \leq g_1 =: \frac{(\mu + e_2)(\mu + e_4)}{a_3}(B_2 - 1) - \frac{Ka_5(\mu + e_1)(\mu + e_4)}{r_1 a_3}(B_1 - 1) < g$. Unless the source term g is greater than g_1, E_4 is unstable. Now, we present the last theorem of this study below.

Theorem 4: The equilibrium point E_4 exists if $B_1 > 1$. Moreover, it is locally asymptotically stable if

$$0 \leq g_1 =: \frac{(\mu + e_2)(\mu + e_4)}{a_3}(B_2 - 1) - \frac{Ka_5(\mu + e_1)(\mu + e_4)}{r_1 a_3}(B_1 - 1) < g \text{ and } B_3 < 1 \text{ hold.}$$

When we compare Thm.3 and Thm.4, we observe that the lower bound on the dosage g is lower for E_4 than the bound for E_3 . In other words, the condition on the dosage, namely g_1 , to make equilibrium point E_4 (where $N \neq 0$) stable is less restrictive than the condition, namely g_0 , associated with the case where $N = 0$. It is because of the competition between tumor cells and healthy cells, that is, the term $a_5 TN$. Since this term contributes to eradication of tumor cells, a smaller dose of virotherapeutic drug is enough for E_4 to be stable.

IV. NUMERICAL RESULTS

Some numerical examples will be presented to discuss the theorems in the previous sections. Numerical results are obtained with the use of ode45 function of MATLAB. The system is solved from $t = 0$ to $t = 1000$ to see the overall trend of the solution.

A. Examples for S-N-T model

We take the values of the parameters as $f = 0.02, a_2 = 0.5, \mu = 0.02, e_1 = 0.01, e_2 = 0.008$ [Sec.4, 29] and we choose the others as $K = 1, a_5 = 0.8$. The values of r_1 and r_2 will be specified later.

We start with E_1 and we take $r_1 = 0.02, r_2 = 0.8$. The initial conditions are fixed as $S_0 = 0.15, N_0 = 0.05, T_0 = 0.8$. With these choice of the parameters, $B_1 = 0.6667 < 1$ and $B_2 = 14.2857 > 1$ as required by Thm.1 for stability and we observe that the solution converges to the equilibrium point $E_1 = (0.07, 0, 0.5314)$ as shown in Fig. 1.

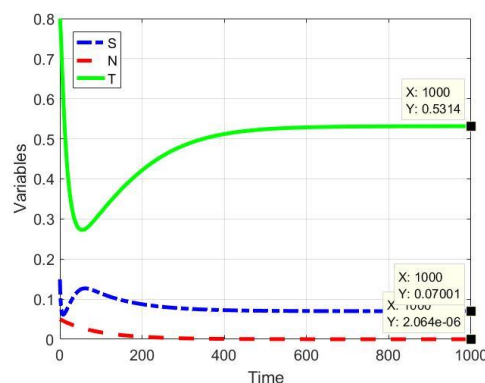


Figure 1. Numerical solution associated with E_1 .

We proceed with E_2 by taking $r_1 = 0.05, r_2 = 0.2$. The initial conditions are chosen as $S_0 = 0.15, N_0 = 0.8, T_0 = 0.05$. We calculate $B_1 = 1.6667 > 1$ and $B_2 = 3.5714 < \frac{Ka_5(\mu+e_1)}{r_1(\mu+e_2)}(B_1 - 1) + 1 = 12.4286$, which agrees with Thm.2. Thus, the solution converges to the equilibrium point $E_2 = (1, 0.4, 0)$, as shown in Fig.2.

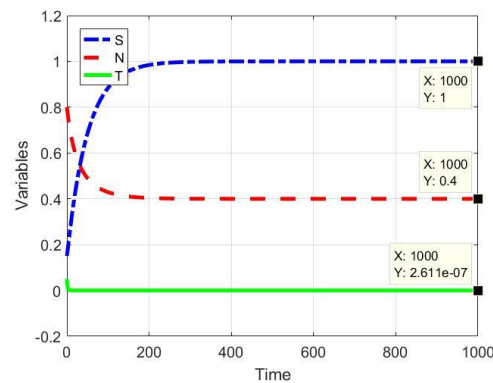


Figure 2. Numerical solution associated with E_2 .

B. Examples For The New Model

We test the contribution of M1 virus to tumor eradication. The new parameter values are set as $a_3 = 0.1, r_3 = 0.5$ [Sec.4, 29] and $a_2 = 0.05, a_4 = 0.2, r_1 = 0.01, r_2 = 0.8, \alpha = 0.1, e_4 = 0.01, a_5 = 0.9, e_3 = 0.1, r_4 = 0.2$. Two different values of g will be used to test numerical stability.

As the first case, we fix $g = 0.01$ and the initial conditions are chosen as $S_0 = 0.7, N_0 = 0.05, T_0 = 0.03, I_0 = 0.02, V_0 = 0.2$. With these choices of the parameters, $g_0 = 0.084 > g = 0.01$, which contradicts with Thm.3. The solution does not converge to the equilibrium point E_3 , as shown in Fig.3.

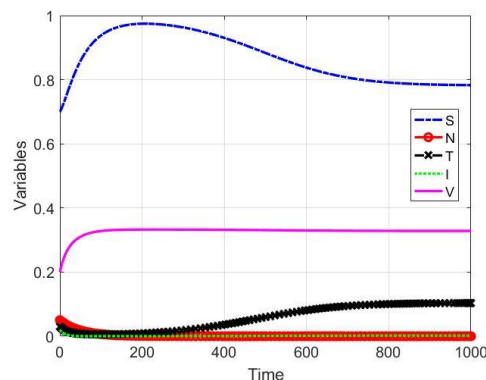


Figure 3. Numerical solution associated with E_3 .

Now, as the second case, we set $g = 0.1 > g_0 = 0.084$. Then, we observe that $B_1 = B_3 = 0.3333 < 1$ and $B_2 = 1.4286 > 1$. By Thm.3, the equilibrium point $E_3 = (1, 0, 0, 0, 0.3333)$ is stable as can be seen in Fig.4.

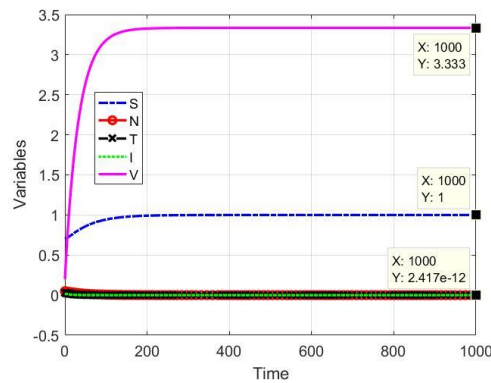


Figure 4. Numerical solution associated with E_3 .

We proceed with E_4 by fixing $a_2 = 0.5, r_1 = 0.04, a_3 = 0.1, g = 0.01, S_0 = 0.6, N_0 = 0.25, T_0 = 0.03, I_0 = 0.02, V_0 = 0.1$. Then, we compute $g_1 = 0.0441 > g = 0.01$. Therefore, the solution does not converge to the equilibrium point E_4 as shown in Fig.5.

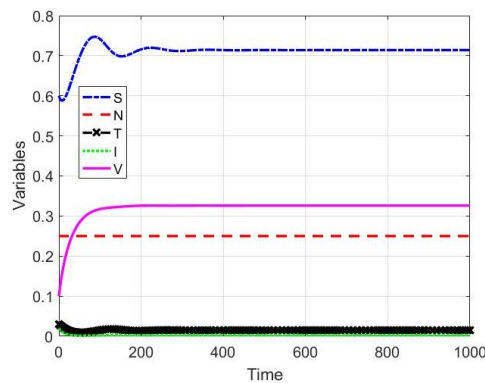


Figure 5. Numerical solution associated with E_4 .

We change the source term as $g = 0.05 > g_1 = 0.0441$ and the conditions in Thm.4, namely $B_1 = 1.3333 > 1, B_3 = 0.3333 < 1$ are satisfied. Thus, with these values of the parameters, $E_4 = (1, 0.25, 0, 0, 1.667)$ is stable and we plot the solution in Fig.6.

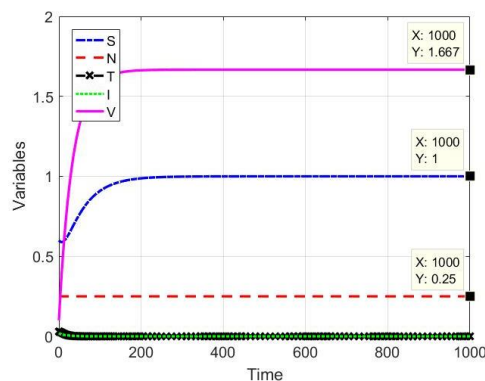


Figure 6. Numerical solution associated with E_4 .

V. SUMMARY AND CONCLUSION

We extend a mathematical model given in the study [29] to investigate the contribution of oncolytic virotherapy. Tumor cells are split into two classes as uninfected and infected tumor cells which is not the case in the study [29]. On the other hand, logistic growth is used for healthy cells. Competition between tumor cells and normal cells are included so that we can test the impact of the competition to drug use to eradicate tumor burden. Afterwards, tumor free equilibrium points are found and their stability is discussed. We determine that the stability of the system in case of no tumor cells and healthy cells is related with the minimum virus dosage injected into the host. In case of no tumor cells, but healthy cells, the minimum dosage is smaller than the previous case for stability of the equilibrium point. Therefore, we find out that existence of healthy cells in the host increases the chance of eradication of tumor cells with a smaller virus recruitment rate. Finally, we present some numerical results to exemplify our theoretical findings.

ACKNOWLEDGMENT

The author is grateful to the anonymous referees for their valuable comments and helpful suggestions, which helped to improve the presentation of this work.

REFERENCES

- [1] National Cancer Institute. July, 2019. What is cancer? <https://www.cancer.gov/about-cancer/understanding/what-is-cancer>.
- [2] Schreiber, R. D., Old, L. J., & Smyth, M. J. (2011). Cancer immunoediting: integrating immunity's roles in cancer suppression and promotion. *Science*, 331(6024), 1565-1570.
- [3] Finn, O. J. (2012). Immuno-oncology: understanding the function and dysfunction of the immune system in cancer. *Annals of Oncology*, 23(suppl_8), viii6-viii9.
- [4] Dunn, G. P., Old, L. J., & Schreiber, R. D. (2004). The three Es of cancer immunoediting. *Annual Reviews of Immunology*, 22, 329-360.
- [5] Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R. L., Torre, L. A., & Jemal, A. (2018). Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 68(6), 394-424.
- [6] Miller, K. D., Siegel, R. L., Lin, C. C., Mariotto, A. B., Kramer, J. L., Rowland, J. H., Stein, K. D., Alteri, R. & Jemal, A. D.V.M. (2016). Cancer treatment and survivorship statistics, 2016. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 66(4), 271-289.
- [7] Mamat, M., Subiyanto, K. A., & Kartono, A. (2013). Mathematical model of cancer treatments using immunotherapy, chemotherapy and biochemotherapy. *Applied Mathematical Sciences*, 7(5), 247-261.
- [8] Melief, C. J. (2008). Cancer immunotherapy by dendritic cells. *Immunity*, 9(3), 372-383.
- [9] Senkus-Konefka, E., & Jassem, J. (2006). Complications of breast-cancer radiotherapy. *Clinical Oncology*, 18(3), 229-235.
- [10] Brennan, M. F. (2005). Current status of surgery for gastric cancer: A review. *Gastric Cancer*, 8(2), 64-70.
- [11] Zhang, J., Yang, P. L., & Gray, N. S. (2009). Targeting cancer with small molecule kinase inhibitors. *Nature Reviews Cancer*, 9(1), 28.
- [12] Russell, S. J., Peng, K. W., & Bell, J. C. (2012). Oncolytic virotherapy. *Nature Biotechnology*, 30(7), 658.

- [13] Kuznetsov, V. A., Makalkin, I. A., Taylor, M. A., & Perelson, A. S. (1994). Nonlinear dynamics of immunogenic tumors: parameter estimation and global bifurcation analysis. *Bulletin of Mathematical Biology*, 56(2), 295-321.
- [14] Enderling, H., & Chaplain, M. A. J. (2014). Mathematical modeling of tumor growth and treatment. *Current pharmaceutical design*, 20(30), 4934-4940.
- [15] De Pillis, L. G., Radunskaya, A. E., & Wiseman, C. L. (2005). A validated mathematical model of cell-mediated immune response to tumor growth. *Cancer Research*, 65(17), 7950-7958.
- [16] Webb, S. D., Sherratt, J. A., & Fish, R. G. (2002). Cells behaving badly: a theoretical model for the Fas/FasL system in tumour immunology. *Mathematical Biosciences*, 179(2), 113-129.
- [17] Nazari, F., Pearson, A. T., Nör, J. E., & Jackson, T. L. (2018). A mathematical model for IL-6-mediated, stem cell driven tumor growth and targeted treatment. *PLoS Computational Biology*, 14(1), e1005920.
- [18] Wei, H. C. (2018). A mathematical model of tumour growth with Beddington–DeAngelis functional response: a case of cancer without disease. *Journal of Biological Dynamics*, 12(1), 194-210.
- [19] Robertson-Tessi, M., El-Kareh, A., & Goriely, A. (2012). A mathematical model of tumor–immune interactions. *Journal of Theoretical Biology*, 294, 56-73.
- [20] De Pillis, L. G., Gu, W., & Radunskaya, A. E. (2006). Mixed immunotherapy and chemotherapy of tumors: modeling, applications and biological interpretations. *Journal of Theoretical Biology*, 238(4), 841-862.
- [21] Ledzewicz, U., Wang, S., Schättler, H., André, N., Heng, M. A., & Pasquier, E. (2017). On drug resistance and metronomic chemotherapy: A mathematical modeling and optimal control approach. *Mathematical Biosciences & Engineering*, 14(1), 217-235.
- [22] Lawler, S. E., Speranza, M. C., Cho, C. F., & Chiocca, E. A. (2017). Oncolytic viruses in cancer treatment: A review. *JAMA Oncology*, 3(6), 841-849.
- [23] Dingli, D., Cascino, M. D., Josić, K., Russell, S. J., & Bajzer, Ž. (2006). Mathematical modeling of cancer radiovirotherapy. *Mathematical Biosciences*, 199(1), 55-78.
- [24] Bajzer, Ž., Carr, T., Josić, K., Russell, S. J., & Dingli, D. (2008). Modeling of cancer virotherapy with recombinant measles viruses. *Journal of Theoretical Biology*, 252(1), 109-122.
- [25] Wodarz, D. (2004). Computational approaches to study oncolytic virus therapy: insights and challenges. *Gene Therapy and Molecular Biology*, 8, 137-146.
- [26] Okamoto, K. W., Amarasekare, P., & Petty, I. T. (2014). Modeling oncolytic virotherapy: Is complete tumortropism too much of a good thing?. *Journal of Theoretical Biology*, 358, 166-178.
- [27] Eftimie, R., & Eftimie, G. (2018). Tumour-associated macrophages and oncolytic virotherapies: a mathematical investigation into a complex dynamics. *Letters in Biomathematics*, 5(sup1), S6-S35.
- [28] Mahasa, K. J., Eladdadi, A., De Pillis, L., & Ouifki, R. (2017). Oncolytic potency and reduced virus tumorspecificity in oncolytic virotherapy. A mathematical modelling approach. *PloS One*, 12(9), e0184347.
- [29] Wang, Z., Guo, Z., & Peng, H. (2016). A mathematical model verifying potent oncolytic efficacy of M1 virus. *Mathematical Biosciences*, 276, 19-27.
- [30] Lin, Y., Zhang, H., Liang, J., Li, K., Zhu, W., Fu, L., et al (2014). Identification and characterization of alphavirus M1 as a selective oncolytic virus targeting ZAP-defective human cancers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(42), E4504-E4512.

- [31] De Pillis, L. G., & Radunskaya, A. (2003). The dynamics of an optimally controlled tumor model: A case study. *Mathematical and Computer Modelling*, 37(11), 1221-1244.

Araştırma Makalesi - Research Article

Geosentetik Donatılı İstinat Duvarının Analitik, Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri ile Performans Analizi

Eren Balaban^{1*}, Aleš Šmejda², Mehmet İnanç Onur³

Geliş / Received: 17/03/2020

Revize / Revised: 16/08/2020

Kabul / Accepted: 01/10/2020

ÖZ

İnşa edilmelerinin kolaylığı ve deprem yükleri altında sergiledikleri performanstan dolayı donatılı zemin uygulaması ile inşa edilen istinat duvarlarına olan ilgi dünya çapında artmaktadır. Bu çalışmada 450 mm yüksekliğinde kum ve kil dolguya sahip donatılı istinat duvarları inşa edilerek köprü ayağı yükleme şartlarında test edilmiştir. Elde edilen test sonuçlarından yararlanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar ile yapılan parametrik çalışmada donatı rijitliği, donatı sıklığı ve donatı uzunluğunun temel oturmasına, istinat duvarı boyunca oluşan yatay deplasmanlara, her bir donatı üzerinde oluşan maksimum çekme kuvveti ile toplam maksimum çekme kuvvetine ve şev duyarlılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Donatılı Zemin, Kum, Kil, Geosentetik

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: erenb@eskisehir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9559-0127>)

Department of Civil Engineering, Eskisehir Technical University, İki Eylül Campus, Eskisehir, Turkey

²İletişim: ales.smejda@upce.cz (<https://orcid.org/0000-0003-1457-0285>)

Department of Transport Structures, University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty, Czech Republic

³İletişim: mionur@eskisehir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2421-4471>)

Department of Civil Engineering, Eskisehir Technical University, İki Eylül Campus, Eskisehir, Turkey

Performance Analysis of Geosynthetic Reinforced Earth Wall by Analytical Experimental and Finite Element Methods

ABSTRACT

Ease of construction and performance under earthquake loads causes interest in construction of reinforced earth walls worldwide. In this study, reinforced earth walls with sand and clay backfill at a height of 450 mm are constructed and tested under bridge abutment loading conditions. A finite element analysis is performed and results are compared with experiment results. In the parametric study made by conducting finite element method, effect of reinforcement stiffness and reinforcement density on the horizontal displacements along the retaining wall face, the maximum tensile force, total maximum tensile force, and slope stability are investigated.

Keywords- Reinforced Earth Wall, Sand, Clay, Geosynthetic

I. INTRODUCTION

Reinforced earth walls have been constructed all over the world since they are light weight and easy to construct. They are also less susceptible to earthquake forces. Due to those advantageous properties, reinforced earth walls have been preferred frequently. There are several design codes around the world related to design parameters of reinforced earth walls. These design codes limit the properties of soil to be used for construction of reinforced earth wall. However, there are lots of examples in the literature that cohesive or marginal soils have been used in the construction of reinforced earth wall [1-8]. It is said that when cohesive soil is used during construction, higher strains acting on reinforcement is measured [1,8]. It is also stated in [8] that in the case of clay backfill creep forces are higher. Therefore, increase in creep forces yields increase in wall displacement [5]. However, in [6], it is stated that increase in cohesion yields lower wall displacements. In a hybrid backfilled reinforced earth wall in which top half of the backfill is clay and remaining is sand, two peak stresses acting over reinforcements are observed [4]. In a study regarding failure of reinforced earth wall [7], one of the main reason is stated as the fine particles reduces permeability which caused failure after heavy rain. There is also study to improve behaviour of fine backfill by treating with lime [3]. There are also studies regarding performance of reinforced earthwalls considering effects of various factors [9-18]. Behaviour of reinforced earth wall under strip loading is studied experimentally [9]. Experimental and numerical studies are conducted for two tiered walls [10]. Study revealed that maximum horizontal tensile loads on lower part decrease as the upper part move away from lower part. However, after some distance, maximum tensile force on reinforcements remains constant. Using demolition waste as a backfill is investigated by [11] for a reinforced earth wall over collapsible soil. Performance of geosynthetically reinforced earth wall under static footing load over rigid foundation is studied by [12]. Effect of connection type, width of foundation, length of foundation, and offset distance of footing is investigated. Effect of compaction into reinforcement strains are investigated by [13]. It is seen that well compacted soil yielded higher strains on reinforcements but lower horizontal displacement of wall facing. Polypropylene fibers are added into backfill soil, and its performance is evaluated by [14]. Time dependent behavior of reinforced earth wall is studied using centrifuge setup by [15]. Short term and long term performance of reinforced earth wall is determined in this study. Geogrid and sand-fly ash backfill is used as reinforcement for counterfort retaining wall [16]. Addition of those materials yielded more stable counterfort wall. Experiments and finite element models are conducted by [17] to clarify the bearing capacity of strip footing on reinforced earth wall. Effect of number of reinforcement, depth of reinforcement, vertical spacing of reinforcement and distance of footing are considered during study. Effect of recycled tire chips mixed with sand is studied by [18].

It is very clear that effects of various conditions on the performance of reinforced earth walls are studied in the literature. Although performance of reinforced earth wall is evaluated both for sand and clay soils, there is lack of study in order to compare the behaviour of earth walls constructed with sand and clay backfills under effect of footing load. Therefore, model walls are constructed in the laboratory with sand and clay backfills and tested. Parametric study is conducted considering effect of reinforcement stiffness, reinforcement density, and reinforcement length to settlement of footing, horizontal displacement, maximum horizontal tensile force, and total horizontal tensile force and slope stability. Tensile forces acting over each reinforcement layers are calculated analytically according to federal highway administration (FHWA) method. Calculated forces are compared with computed forces by finite element models.

II. MATERIAL AND METHOD

Crushed sand and locally available clay are used in this study. Material properties are determined at laboratory except specific gravity of sand. Specific gravity of sand is given as 2.9 by the producer. Sieve analysis is conducted at laboratory for classification of sand. Particle size distribution of sand is given on Figure 1 below. According to result of particle size distribution coefficient of uniformity (C_u) and coefficient of gradation (C_c) is calculated as 3.3 and 0.84 respectively. According to C_u and C_c , sand is classified as poorly graded sand (SP) according to unified classification system.

Particle size distribution of clay sample is given on Figure 2. Liquid limit and plastic limit of the clay sample is determined as 35.9 and 20.2 respectively. Clay is classified as CL according to unified classification system.

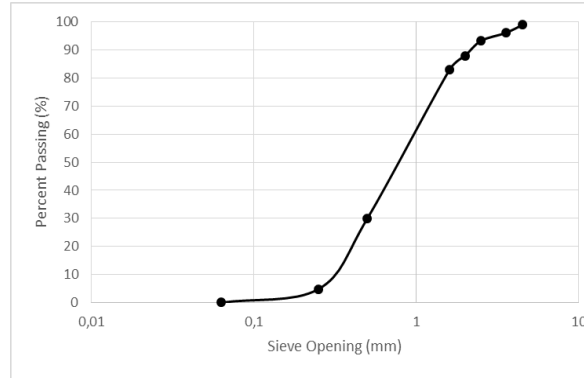


Figure1. Particle size distribution of sand

Standard proctor test is conducted in order to determine maximum dry unit weight and optimum water content for both samples. Maximum dry unit weights are found as 17.4 kN/m^3 and 18.5 kN/m^3 , optimum water contents are found as 11.5% and 12.5% for sand and clay samples respectively.

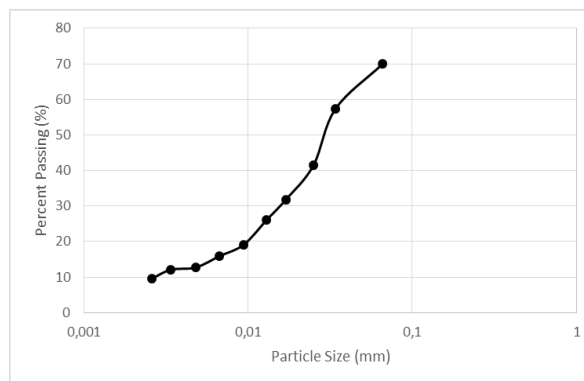


Figure 2. Particle size distribution of clay

Direct shear tests are conducted to sand and clay samples in order to determine angle of friction and cohesion. Direct shear tests are conducted according to Czech Standart CSN CEN ISO/17892-10. Speed of direct shear test differs for sand and clay according to standart. Applied shear rate equals to 0.25 mm/min to sand samples while it is equal to 0.0625 mm/min for clay samples in order to prevent development of excess pore water pressure. Angle of frictions are found as 47.4° and 32.4° for sand and clay respectively. Cohesion values are found as 0.5 kPa and 38.7 kPa for sand and clay.

Wrap – around reinforced walls are constructed at a height of 450 mm with 9 layers of geotextile. Geotextile layers are equally distributed at an interval of 50 mm. Both sand and clay is compacted at their optimum water contents. Commercially available geotextile is used throughout the study. Tensile strenght of geotextile is provided as 110 kN/m and 50 kN/m longitudinally and laterally respectively. Tensile strengths are achieved at 10.5% and 11% strains longitunally and laterally respectively. Stiffness of geotextile is calculated as 1048 kN/m. Static loading is applied as consecutive loading sequences. Initial load is selected such that it corresponds to 0.06 MPa vertical stress. It is increased in each new load step by 0.06 MPa. Horizontal displacements of wall face are measured at three different locations. Settlement of loading plate is also measured. Experimental setup is provided at Figure 3.

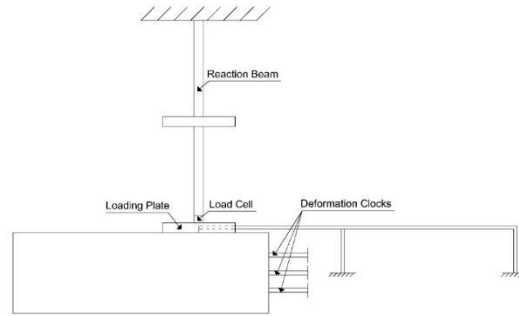


Figure 3. Experiment setup of laboratory test

Experiment cell is constructed at the laboratory especially to perform these kind of tests. It is made of steel and covered by thick plexi-glass. Middle section of the plexi-glass cover is strengthened by steel bars to prevent from unintended deformation. Experiment cell is approximately 3.5 m * 1.5 m * 2 m by length, width and height respectively. Loading plate is chosen identical to static loading plate whose diameter equal to 266 mm. Dimension of the loading plate is chosen such that it represent the loading conditions of a bridge abutment constructed on reinforced earth walls. Loading cell may be seen on Figure 4 below.



Figure 4. Loading cell used during study

Walls are constructed by compacting sand and clay by layer by layer. All walls are constructed in 9 lifts which each lift equals to 50 mm. Required amount of soil is prepared for each lift and then placed over reinforcement. After that, compaction is applied by using hand plate. 95% relative density of maximum dry unit weight determined by standard proctor test is achieved for each lift.

Plaxis finite element code is used in order to simulate experiments, 15 nodes and 12 stress points are used during meshing of structures. Plaxis model was created as same as the test model. Plaxis model has height of 500 mm and width of 650 mm. Geotextile layers are placed in finite element model same as experiment which means there is 50 mm interval between two consecutive layers. Finite element models consist of 1519 elements, 12371 nodes, 18228 stress points. Average element size is given as 15.18 mm. Meshed structure from finite element code is given on Figure 5 below. Mohr – Coulomb material model is applied to sand and clay while elastic material is assigned to plate element representing loading plate. Plastic analysis with updated mesh condition is performed during study. Loading stage is simulated by applying point load to center of loading plate which is identical to tests performed. In order to determine factor of safety against slope stability, stress reduction method is applied. This method reduces strength parameters of soils until the slope failure occurs, and

then calculates the ratio between initial value and final reduced value which is the factor of safety against slope failure. This analysis can be performed by selecting phi-c reduction method in Plaxis. This method was applied in this study in order to calculate factor of safety against slope stability. Material properties of soils are determined by using results of direct shear tests. Loading plate is modelled as rigid material. Material properties of soils and rigid plate are provided on Table 1.

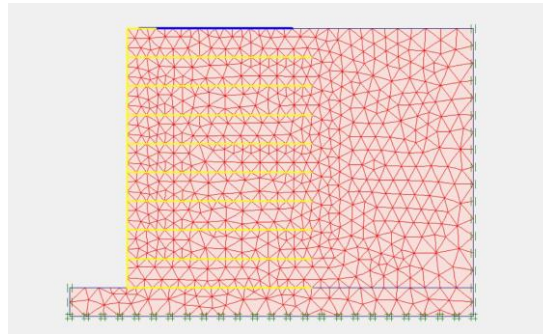


Figure 5. Meshed structure of finite element model

Table 1. Material Properties used in finite element models

	Materials		
	Sand	Clay	Loading Plate
Unit Weight (kN/m ³)	17.4	18.5	
Elasticity Modulus (kPa)	64020	85670	
Poisson's Ratio	0.3	0.3	
Angle of Friction (°)	47.4	32.4	
Cohesion (kPa)	1.0	37.7	
Dilatancy Angle (°)	17.4	2.4	
Axial Stiffness (EA) (kN/m)	-	-	10 ⁹
Bending Stiffness (EI)	-	-	10 ⁸

Elasticity modulus of sand and clay backfills are calculated from shear modulus determined from direct shear tests results conducted at 100 kPa. Shear modulus of samples are determined by dividing shear stress corresponding to 0.2% strain. As poisson's ratio is chosen as 0.3 which is very common for soil samples, elasticity modulus is calculated by following formula.

$$E = 2G(1+\nu) \quad (1)$$

Poisson's ratio is determined according to literature as 0.3 which is the smallest value for the dense sand. Same value is accepted for clay and it is in the given interval by [22]. Dilatancy angle is computed by the following formula which is commonly accepted in literature.

$$\psi = \phi - 30 \quad (2)$$

FHWA design method is a load resistance factor design method. This means that loads acting on structures are increased by a factor while resistance of a structure is decreased. This design methodology is applied in our study in order to determine loads and resistance of structure. Details of the design method can be found on [23].

III. RESULTS

A. Experiment Results

Static tests are continued until walls are failed. The failure occurred at different load states. When sand backfill is used during construction, wall withstood against 0.50 MPa footing stress, however, in case of clay backfill, reinforced earth wall was only able to withstand against 0.18 MPa footing stress. Settlement of loading plate is lower for sand backfill than clay backfill. Settlement measured for sand backfill equals to 4.44 mm under 0.5 MPa. When clay backfill is considered, settlement of loading plate is measured as 1.62 mm under 0.19 MPa. Measured settlement values for sand and clay is given on Figure 6.

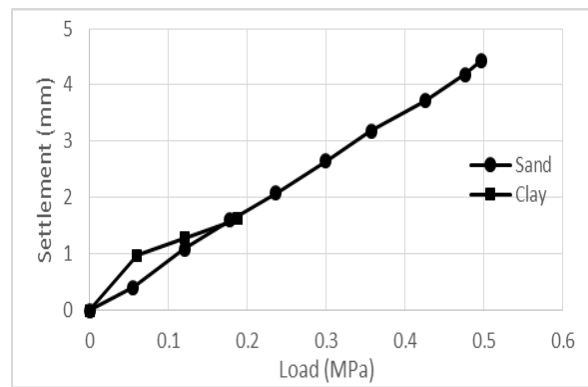


Figure 6. Settlement of loading plates

Although the difference between settlement values seems to be low, loading is stopped for clay backfilled sample, because wall failed. Failure of wall is observed when loading is tried to be increased, settlements increased and loads stayed constant. Failure cracks are also observed. Those failure cracks may be seen on Figure 7.



Figure 7. Failure cracks of reinforced earth wall with clay backfill

Horizontal displacements are measured for sand backfill under 0.5 MPa is found to be 1.9 mm, 1.4 mm and 0.67 mm at top, middle and bottom of the wall respectively. Horizontal displacements increase to 3.4 mm, 4.9 mm and 2.6 mm at top, bottom and middle of the wall respectively under 0.19 MPa for clay backfill. Results show that although lower load is applied to clay backfill, horizontal displacements are higher than sand backfill.

Measured horizontal displacements for clay backfill show that bulging occurred at the middle of the wall. Change of horizontal displacements with respect to magnitude of load and backfill type is shown on Figure 8.

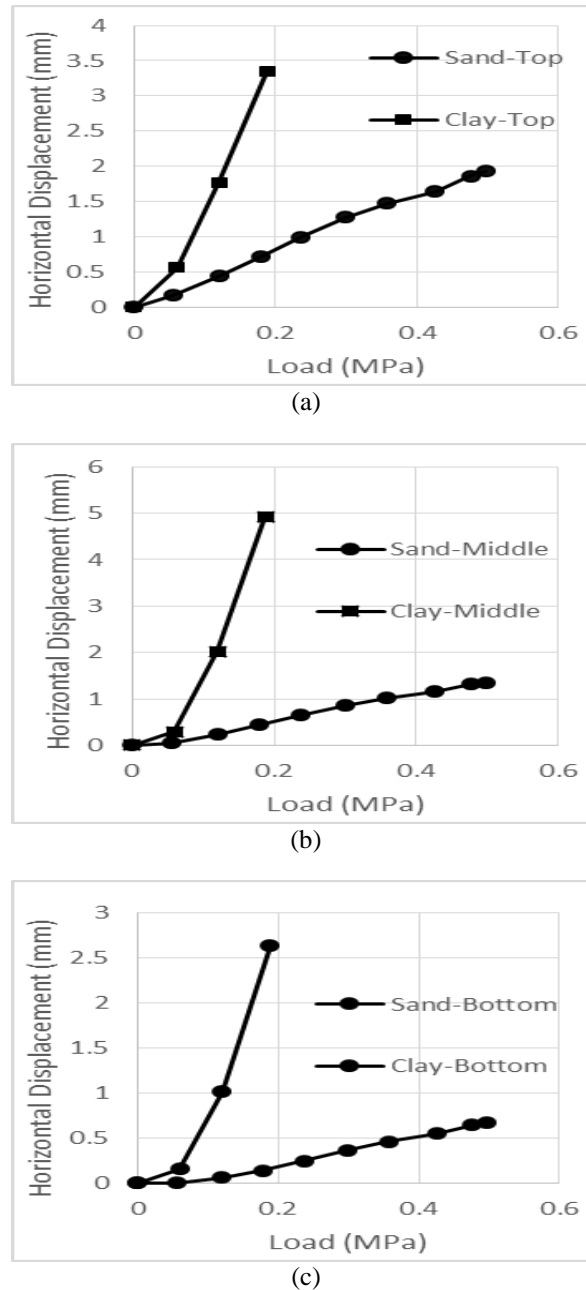


Figure 8. Horizontal displacements measured for sand and clay backfills (a) top (b) middle (c) bottom of wall

B. Finite Element Models

The results of laboratory tests are compared initially in order to show finite element model is capable for parametric study. Results of parametric study are presented later in this section for both type of backfills. Finite element analysis performed under same loading conditions and same load magnitudes as experimental study performed at the laboratory. This means that loading of walls were stopped when applied vertical stress

was equal to 0.5 MPa for sand backfill, while it is stopped when applied vertical stress was equal to 0.19 MPa for clay backfill. Those stress levels were maintained throughout the study with respect to backfill type. Settlement of loading plate for sand backfill is computed as 3.6 mm while it is measured as 4.4 mm under 0.5 MPa load. Horizontal deformation profiles computed by Plaxis software is given on Figure 9 and Figure 10 for sand and clay backfill respectively.

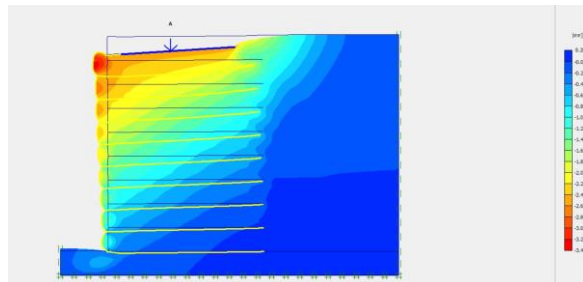


Figure 9. Horizontal deformation profile for sand backfill at 0.50 MPa

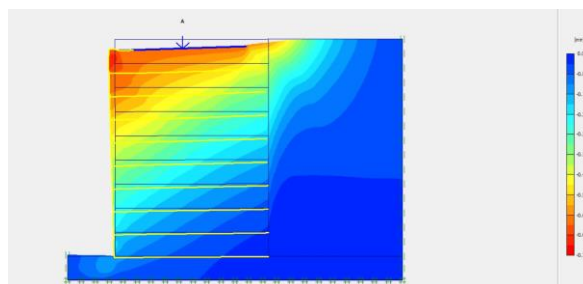


Figure 10. Horizontal deformation profile for clay backfill at 0.19 MPa

Increment of settlements under different load levels are provided on Figure 11. It is seen from Figure 11 that results for settlement complies with each other. It should be noted that settlements better comply with each other at lower load levels, while deviations begin at higher load levels.

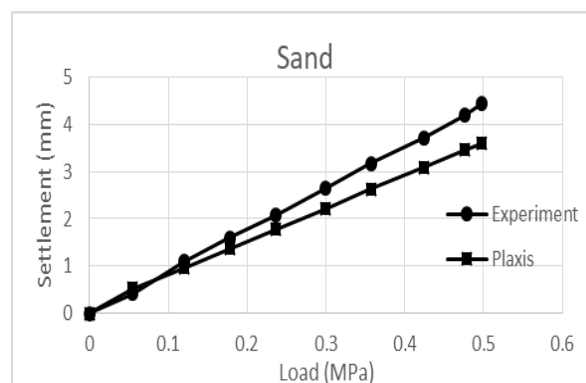


Figure 11. Measured and computed settlements of loading plate under various loads for sand backfill

When settlement of loading plate is compared for clay backfill, it is seen that lower settlements are computed by finite element. Settlement is computed as 0.99 mm under 0.19 MPa while it is measured as 1.62

mm during experiment. Comparison of settlements for other load levels may be seen on Figure 12 given below. Plaxis overestimated horizontal displacements for sand backfill and underestimated for clay backfill.

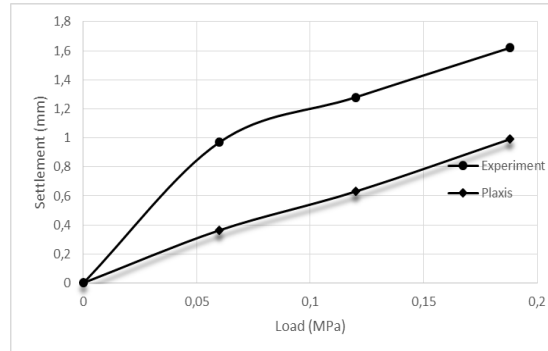


Figure 12. Measured and computed settlements of loading plate under various loads for clay backfill

The highest horizontal displacements are computed as 2.54 mm, 2.06 mm and 1.15 mm at top, middle, and bottom of the wall respectively for sand under 0.5 MPa. In case of clay backfill, computed horizontal displacements decrease to 0.72 mm, 0.42 mm and 0.23 mm at top, middle and bottom of the wall respectively under 0.19 MPa. Horizontal displacements under various displacements are given on Table 2 and Table 3 for sand and clay backfills respectively.

Table 2. Measured and computed horizontal displacement of horizontal displacement for sand backfill

Load (MPa)	Top		Middle		Bottom	
	Experiment (mm)	Plaxis (mm)	Experiment (mm)	Plaxis (mm)	Experiment (mm)	Plaxis (mm)
0	0	0	0	0	0	0
0.06	0.17	0.38	0.05	0.28	0	0.19
0.12	0.44	0.66	0.24	0.52	0.06	0.28
0.18	0.72	0.94	0.45	0.76	0.14	0.43
0.24	1.00	1.23	0.65	0.98	0.24	0.55
0.30	1.28	1.54	0.86	1.24	0.36	0.69
0.36	1.48	1.84	1.02	1.48	0.46	0.83
0.43	1.65	2.18	1.16	1.77	0.55	0.99
0.48	1.86	2.44	1.32	1.97	0.64	1.10
0.50	1.93	2.54	1.35	2.06	0.70	1.15

Table 3. Measured and computed horizontal displacement of horizontal displacement for clay backfill

Load (MPa)	Top		Middle		Bottom	
	Experiment (mm)	Plaxis (mm)	Experiment (mm)	Plaxis (mm)	Experiment (mm)	Plaxis (mm)
0	0	0	0	0	0	0
0.06	0.57	0.27	0.29	0.15	0.16	0.08
0.12	1.78	0.43	2.20	0.25	1.02	0.13
0.19	3.35	0.72	4.93	0.42	2.64	0.23

Since measured and computed values are close enough, especially for sand backfill, parametric study may be conducted.

C. Parametric Study

Results of parametric study considering geotextile stiffness and reinforcement density are presented in this section. Factor of safety against slope stability with respect to load level is provided in this section also. In case of tensile loads on geotextile are also calculated according to federal highway administration method (FHWA) and compared with finite element method results.

1) *Effect of Geotextile Stiffness*: In order to determine the effect of geotextile stiffness, additional stiffness values of 2096 kN/m, 4000 kN/m, 8000 kN/m and 10000 kN/m are used. Calculated results are compared with each other. When tensile loads acting on reinforcements are compared, it is seen that higher maximum tensile loads are observed at higher reinforcement stiffness. However, FHWA method underpredicts the tensile loads on the reinforcements for both backfill type. Reinforcement tensile loads are provided on Table 4 for sand backfill and Table 5 for clay backfill. Negative tensile forces are computed according to FHWA when clay backfill is considered, however positive values are computed in each different reinforcement density for clay backfill.

Table 4. Computed maximum tensile forces with respect to stiffnesses for sand backfill

Layer Number	Stiffness					FHWA
	1048 kN/m	2096 kN/m	4000 kN/m	8000 kN/m	10000 kN/m	
1	4.58	4.91	5.89	7.23	7.65	6.21
2	4.86	5.08	6.69	8.77	9.39	3.76
3	4.70	5.22	6.72	8.70	9.26	3.51
4	4.66	5.37	6.57	8.26	8.75	3.38
5	4.96	5.60	6.80	8.30	8.77	3.18
6	5.10	5.72	6.94	8.41	8.88	2.93
7	5.19	5.83	7.03	8.39	8.84	2.79
8	5.08	5.79	6.94	8.09	8.48	2.66
9	3.28	3.91	4.96	6.20	6.62	1.28

Table 5. Computed maximum tensile forces with respect to stiffnesses for clay backfill

Layer Number	Stiffness					FHWA
	1048 kN/m	2096 kN/m	4000 kN/m	8000 kN/m	10000 kN/m	
1	1.75	1.82	2.32	2.85	3.02	0.49
2	1.36	1.64	2.21	2.93	3.17	0.05
3	1.24	1.66	2.18	2.83	3.05	-0.13
4	1.32	1.75	2.27	2.78	2.97	-0.29
5	1.40	1.78	2.28	2.78	2.93	-0.42
6	1.49	1.83	2.34	2.84	2.99	-0.54
7	1.56	1.88	2.40	2.89	3.04	-0.65
8	1.51	1.91	2.38	2.84	2.97	-0.74
9	0.73	1.07	1.49	1.98	2.14	-0.40

Horizontal displacements tend to decrease as the reinforcement stiffness increases. However, amount of change in computed horizontal displacement gets lower in higher reinforcement stiffnesses. Change of horizontal displacements for sand backfill is given on Figure 13.

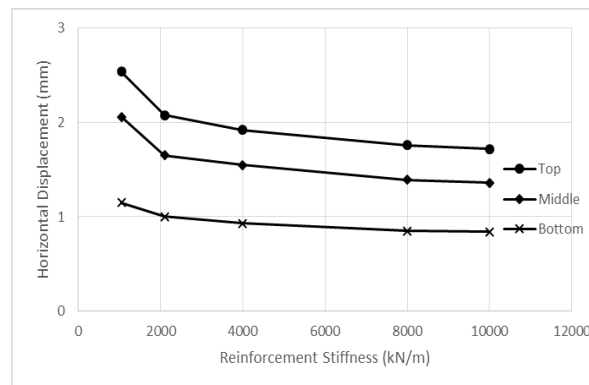


Figure 13. Horizontal displacements for reinforcement stiffness for sand backfill

The initial decrease of the horizontal displacements while the reinforcement stiffness increases is steeper in case of clay backfill than sand backfill at the top of the wall. In case of displacements at the middle of the wall, the change becomes less steep and at the bottom, it becomes straight line. Figure 14 shows the change of horizontal displacements for clay backfill with various reinforcement stiffness.

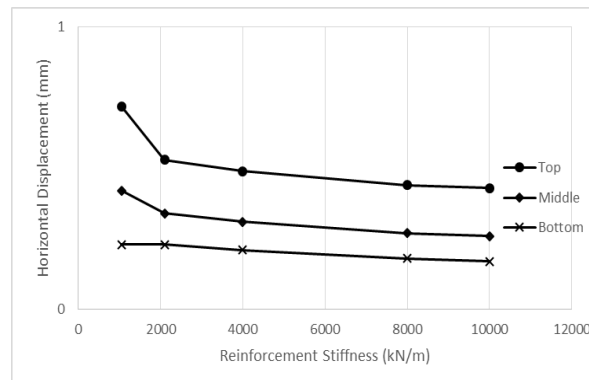


Figure 14. Horizontal displacements for reinforcement stiffness for clay backfill

Settlement of loading plate is affected by the reinforcement stiffness in case of sand backfill. Settlement of loading plate is lower while the reinforcement stiffness is higher. However, decrement of settlement gets lower as the reinforcement stiffness gets higher. Effect of reinforcement stiffness to loading plate settlement is almost disappeared in case of clay backfill. Change of settlements with respect to reinforcement stiffness is given on Figure 15.

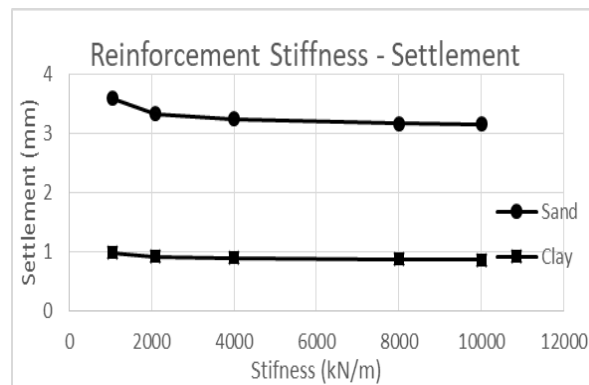


Figure 15. Settlement of loading plate with respect to reinforcement stiffness

2) *Effect of Reinforcement Density*: Reinforcement density can be changed by changing the distance between two consecutive layers. If the distance between two consecutive layers is the highest, then the reinforcement density will be the lowest. Three different density levels are considered in this study as high reinforcement density, medium reinforcement density, and low reinforcement density. The distance between reinforcement layers are chosen as 30 mm, 50 mm and 90 mm respectively. High reinforcement density can be seen on Figure 16 while less dense reinforcement density can be seen on Figure 17. It is seen that as the density of reinforcement increases, settlement of loading plate decreases. Computed settlements may be given as 3.1 mm, 3.6 mm and 5.34 mm from high reinforcement density to low reinforcement density respectively.

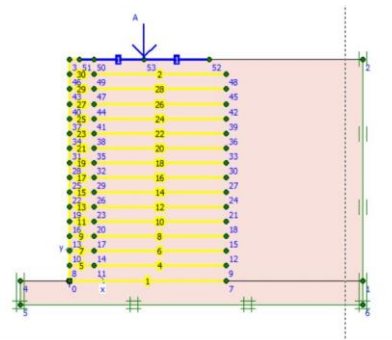


Figure 16. High reinforcement density configuration in FEM analysis

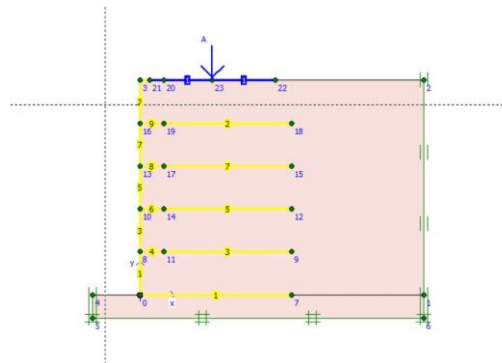


Figure 17. Less reinforcement density configuration in FEM analysis

When the horizontal displacements are considered with respect to reinforcement density, it is seen that there is a slight difference between high and medium reinforcement densities. However, horizontal displacements increase enormously if the low reinforcement density is applied during the design. It should be noted that almost same deformations are calculated especially at the lower part of walls for high reinforcement density and medium reinforcement density. Figure 18 shows the displacement profile of reinforced earth wall. When maximum tensile force acting over reinforcement layers, it is seen that tensile forces decrease as reinforcement density increases. However, resultant maximum tensile forces seem to be unaffected from reinforcement density. Resultant maximum tensile forces are calculated as 48 kN/m, 42 kN/m and 48 kN/m for high, medium and low reinforcement density respectively.

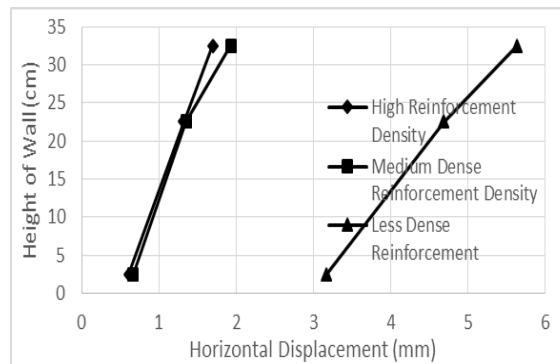


Figure 18. Horizontal displacement of the wall according to reinforcement density

3) *Factor of Safety against Slope Stability*: Factor of safety against slope stability is investigated according to applied load to reinforced earth wall, reinforcement stiffness, and reinforcement density. Phi-c reduction method is used during analysis which is a calculation method provided by finite element code, Plaxis. Phi-c reduction method calculates factor of safety by following formula.

$$F.S = c/c_r = \tan\phi/\tan\phi_r \quad (3)$$

Factor of safety against slope stability calculated by above formula by Plaxis is higher in case of clay backfill than sand backfill. However, as load acting over reinforced wall increases factor of safety decreases in case of clay backfill. On the other hand, there are insignificant changes in factor of safety with respect to load in case of sand backfill. Factor of safety is over 1.2 for sand and clay backfills under different loads. Change of factor of safety with respect to loads is given on Figure 19.

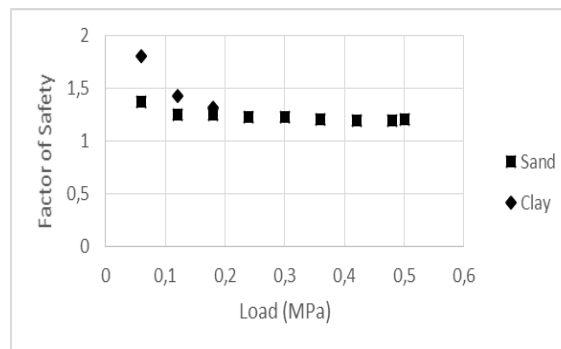


Figure 19. Variation of factor of safety with respect to backfills under different loads

Calculated factor of safety is 1.04 for low density reinforcement and 1.62 for high density reinforcement. Reinforcement stiffness also has high impact on factor of safety against slope stability. Factor of safety increases from 1.21 to 1.41 as the reinforcement stiffness increases to 10000 kN/m from 1048 kN/m.

IV. CONCLUSION

Two reinforced earth walls are constructed at the laboratory which have sand and clay backfill. Those reinforced earth walls are subjected to static testing. Horizontal displacements and settlement of loading plate are measured and recorded. Laboratory test results are used to calibrate finite element model for parametric study.

Breaking points are observed in horizontal displacement – load graphics in case of clay backfills. This behaviour could be attributed to load transfer mechanism from soil to geotextile used in this study. Since load is transferred to geotextile only by friction and clay has considerably lower friction angle than sand, load transfer capacity to geotextile is lower for clay. Therefore, after certain amount of vertical load, clay can not transfer lateral loads to geotextile which caused observation of breaking points for horizontal displacement – load graphics.

Similar loading tests of retaining walls are reported in the literature. Settlement of loading plate is given as 9 mm by [19] under 0.5 MPa. Horizontal wall movement is reported to change between 3 mm and 8 mm for different conditions for reinforced earth walls by [20]. Allowable deformation levels of reinforced earth walls are defined in several design codes and collected on [21]. According to [21], FHWA defined allowable horizontal wall movement between 0.9% and 4%, NGC defined between 0.1% and 0.3%, BS 8006 defined it 0.5% and PWRC defined it as 3% with respect to wall movement to wall height ratio. Wall movement to wall height ratio is calculated as 4.4% and 7.6% for sand and clay backfill respectively. These values are well above the defined values by standards. That is according to these standards, both of the tested walls failed.

Parametric study is conducted regarding reinforcement stiffness and density. Following conclusions can be given according to the findings of this study.

- Horizontal displacements are lower when sand is used as backfill during construction reinforced earth wall.
- Settlement of loading plate shows different behaviour according to type of backfill.
- Factor of safety against slope stability is higher for reinforced earth wall with clay backfill under same loading condition, however, reinforced earth wall with a clay backfill develops horizontal displacements more easily than reinforced earthwall with sand backfill.
- Finite element model captures the behaviour of reinforced earth wall better in case of sand backfill.
- FHWA design method underestimates tensile loads acting over reinforcements.
- When the reinforcement stiffness is higher, tensile force is higher on geosynthetic, the horizontal deformation and plate settlement is lower. The latter one is more obvious in case of sand backfill. Factor of safety against slope stability is higher when reinforcement stiffness is higher.
- As the reinforcement density increases, factor of safety against slope stability increases, and horizontal displacements of reinforced earth wall decreases.

REFERENCES

- [1] Riccio, M., Ehrlich, M., Dias, D. (2014). Field monitoring and analyses of the response of ablock-faced geogrid wall using fine-grained tropical soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 42, 127– 138.

- [2] Pinho-Lopes, M., Carlos, D. M., Lopes, M. L. (2015). Flume Tests on Fine Soil Reinforced with Geosynthetics: Walls of the Salt Pans (Aveiro Lagoon, Portugal). *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng*, 1(2), 1 – 12.
- [3] Yang, G., Liu, H., Lv, P., Zhang, B. (2012). Geogrid-reinforced lime-treated cohesivesoil retaining wall: Case study and implications. *Geotextiles and Geomembranes*, 35, 112 – 118.
- [4] Yang, G., Ding, J., Zhou, Q., Zhang, B. (2010). Field Behavior of a GeogridReinforced Soil Retaining Wall with a Wrap-Around Facing. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, 33,1–6.
- [5] Liu, H., Wang, X., Erxiang Song, E. (2009). Long-term behavior of GRS retaining walls with marginal backfill soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 295 – 307.
- [6] Abdelouhab, A., Dias, D., Freitag, N. (2011). Numerical analysis of the behaviour of mechanically stabilized earth walls reinforced with different types of strips. *Geotextiles and Geomembranes*, 29, 116 – 129.
- [7] Haddad, A., GholamaliShafabakhsh, G. (2008). Failure of segmental retaining walls due to the insufficiency of backfill permeability. *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, June 17 - 20, Shanghai, China, 852 – 856.
- [8] Rowe, R., K., Li, A. L. Insights from case histories: reinforced embankments and retaining walls.
- [9] Bourgeois, E., Soyez, L., Kouby A. L. (2011). Experimental and numerical study of the behaviour of a reinforced-earth wall subjected to a local load. *Computers and Geotechnics*, 38, 515-525.
- [10] Mohamed., B., A., S., Yang, K. H., Hung, W., Y. (2014). Finite element analysis of two-tier geosynthetic-reinforced soil walls: Comparison involving centrifuge tests and limit equilibrium results. *Computers and Geotechnics*, 61, 67 – 84.
- [11] Santos E., C., G., Palmeira, E., M., Bathurst, R., J. (2013). Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. *Geotextiles and Geomembranes*, 39, 9 –19.
- [12] Xiao, C., Han, J., Zhang, Z. (2016). Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 44, 81 – 94.
- [13] Ehrlich, M., Mirmoradi, S., H., Saramago, R., P. (2012). Evaluation of the effect of compaction on the behavior of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 34, 108 – 115.
- [14] Parka, T., Tan, S., A. (2005). Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber. *Geotextiles and Geomembranes*, 23, 348-361.
- [15] Costa, C., M., L., Zornberg, J., G., Bueno, B., S., Costa, Y., D., J. (2016). Centrifuge evaluation of the time-dependent behavior of geotextile-reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2), 188 – 2007.
- [16] Hazra, S., NiharRanjan Patra, N., R. (2008). Performance of Counterfort Walls with Reinforced Granular and Fly Ash Backfills: Experimental Investigation. *GeotechGeolEng*, 26, 259 – 267.
- [17] Ahmadi, H., Bonab, M., H. (2012). Experimental and analytical investigations on bearing capacity of strip footing in reinforced sand backfills and flexible retaining wall. *ActaGeotechnica*, 7, 357 – 373.
- [18] Reddy, S., B., Krishna, A., M., (2015). Recycled tyre chips mixed with sand as lightweight backfill material in retaining wall applications: an experimental investigation. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng*, 1 – 31.

- [19] Siddique, M. S. A., Tanaka, T., Tatsuoka, F., Tani, K., Morimoto, T., (1999). Numerical simulation of bearing capacity characteristics of strip footing on sand. *Soils and Foundations*, 39(4), 93 – 109.
- [20] Anubhav, S., Basudhar, P., K., (2011). Numerical modelling of surface strip footings resting on double-faced wrap-around vertical reinforced soil walls. *Geosynthetics International* 18(1), 21 – 34.
- [21] Bathurst, R., J., Miyata, Y., Allen, T., M., (2010). Facing displacements in geosynthetic reinforced soil walls. *Earth Retention Conference 3*, August 1 – 4, Bellevue, Washington, 442 – 459.
- [22] DasBraja. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering 7th ed.* Cengage Learning, Stamford, CT 06902
- [23] Federal Highway Administration. (2009). *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Slopes.*

Araştırma Makalesi - Research Article

Süperkapasitör Uygulamaları için Elektrodepolanmış Kobalt Temelli Filmin Nikel Köpük Elektrot Üzerine Sentezi

Perihan Yılmaz Erdoğan^{1*}, Naime Özdemir², Hüseyin Zengin³, Abdulcabbar Yavuz⁴

Geliş / Received: 04/07/2019

Revize / Revised: 26/12/2019

Kabul / Accepted: 06/07/2020

ÖZ

Bu çalışmada, kobalt temelli film, süperkapasitör uygulamaları için nikel köpük akım toplayıcıları üzerine elektrodepolanmıştır. Kobalt temelli film, -1,5 V'luk sabit bir voltaj uygulanarak doğrudan pirofosfat elektrolitinden nikel köpük üzerine büyütüldü. Kobalt birikiminin döngüsel voltamogram ve kronoamperometrik verileri sunuldu. Elde edilen kobalt temelli modifiye nikel köpük elektrot daha sonra KOH elektrolitine aktarıldı. Kaplanmamış ve kaplanmış nikel köpük elektrotun elektrokimyasal davranışı bazik ortamda karakterize edildi. Kaplanmamış nikel köpük elektrotun elektro aktivitesi, kobalt film ile kaplandığında önemli ölçüde artışı gözlemlendi. Kobaltla modifiye edilmiş nikel köpük elektrotu KOH elektrolitinde yüksek çevrim kararlılığına sahipti. Kaplanmamış ve kaplanmış nikel köpük elektrotun morfolojisi SEM ile karakterize edildi. Elektrotun 5 ve 100 mV s⁻¹ tarama hızlarındaki spesifik kapasitansı, sırasıyla 538 F g⁻¹ ve 261 F g⁻¹ olarak ölçüldü. Elde edilen kobalt temelli elektrotun hız sınırlayıcı adımı, yüzey kontrollü bir mekanizmaya sahip olduğu gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler- Süperkapasitör, Elektrokimyasal Depolama, Katodik Potansiyel, Elektrolit

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: yilmazperihan8@gmail.com (<http://orcid.org/0000-0002-1375-603X>)

Kimya Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

²İletişim: naimeozdemir027@gmail.com (<http://orcid.org/0000-0003-4744-1316>)

Kimya Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

³İletişim: hzengin@gantep.edu.tr (<http://orcid.org/0000-0002-5540-725X>)

Kimya Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

⁴İletişim: ayavuz@gantep.edu.tr (<http://orcid.org/0000-0002-7216-0586>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

Synthesis of Electrodeposition of Cobalt Based Film on a Nickel Foam Electrode for Supercapacitor Applications

ABSTRACT

In this study, cobalt-based film was electrodeposited on nickel foam current collectors for supercapacitor applications. The cobalt-based film was grown directly from pyrophosphate electrolyte to nickel foam by applying a constant voltage of -1.5 V. Cyclic voltamogram and chronoamperometric data of cobalt deposition were presented. The resulting cobalt based modified nickel foam electrode was then transferred into the KOH electrolyte. Electrochemical behavior of uncoated and coated nickel foam electrode was characterized in alkaline media. Electroactivity of bare nickel foam increased significantly when it was coated with cobalt film. Cobalt modified nickel foam electrode had high cycle stability in KOH. The morphology of uncoated and coated nickel foam electrode was characterized by SEM. The specific capacitance of the electrode at the scan rates of 5 and 100 mV s⁻¹ was measured as 538 F g⁻¹ and 261 F g⁻¹, respectively. The rate-limiting step of the obtained cobalt based electrode had a surface controlled mechanism.

Keywords- *Supercapacitor, Electrochemical Storage, Cathodic Potential, Electrolyte*

I. GİRİŞ

Çevre kirliliği, iklim değişikliği ve küresel ısınma, fosil yakıtlara alternatif yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç doğurmaktadır. [1]. Bu nedenle, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesi ve elde edilen bu enerjilerin istenilen zamanda kullanılması arzulanmaktadır. Elde edilen sürdürülebilir ve yenilenebilir enerjilerin kullanılması için depolanması gereklidir. Süperkapasitörler, enerji depolama sistemlerine yeni bir alternatif olarak son zamanlarda yaygın olarak çalışılmaktadır [2]. Elektrokimyasal süperkapasitörler, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle dikkat çekmektedir. Süperkapasitörler, genel olarak pillerden daha yüksek güç yoğunluğuna ve dielektrik kapasitörlerden daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler [3]. Ultrakapasitörler olarak da bilinen süperkapasitörler hızlı depolama ve enerji salımına sahip ideal bir elektrokimyasal enerji depolama sistemi (pseudo kapasitörler) ya da Elektriksel Çift Katmanlı Kapasitörlerdir. Süperkapasitörler; sürekli güç kaynakları, hibrit elektrikli araçlar ve hüresel cihazların hafıza koruması gibi çeşitli uygulamalar için kullanılabilir [4]. Elektriksel iletkenlik, yüzey kimyası, aktif elektrot malzemelerinin gözenek büyüklüğü ve yüzey alanı, süperkapasitörlerin performansını belirlemede önemli rol oynar [5].

Süperkapasitörler genel olarak yüksek yüzey alanına sahip elektrotlar kullanıldığında yüksek kapasitansa sahiptirler. Süperkapasitörlerde üç tip elektrot malzemesi kullanılır. Karbon temelli malzemeler (karbon nanotüpler, aktif karbon ve grafen gibi) [6], iletken polimerler [7] ve geçiş metali oksitleri/hidroksitleri [8]. Süperkapasitörlerde kullanılan elektrot malzemelerinin özellikleri, elektrolitin performansını ve uygulanan potansiyel kapasitansın belirlenmesinde oldukça önemlidir. Metal oksitler, süperkapasitörlerdeki yüksek performansları nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür [9]. Yüksek performanslı süperkapasitörler elde etmek için metal oksit ve kompozitleri elektrot malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [10]. Kalay oksit [11], kobalt oksit [12], çinko oksit [13] ve diğer geçiş metal oksitler süperkapasitör için elektrot malzemeleri olarak kullanılabilir. Süperkapasitörlerde kullanılan bu metal oksitler arasında, CoOx, psödokapasitif davranışı nedeniyle ümit verici elektrot malzemeleri olarak kullanılmıştır [14].

Kobalt oksitler/hidroksitler; döngüsel kararlılık, yüksek iletkenlik ve yüksek kapasitansları nedeniyle süperkapasitörlerde tercih edilirler [15]. Co₃O₄'ün uzun süreli döngüsel performansı, geniş yüzey alanı, yüksek iletkenliği ve yüksek korozyon direnci gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle, superkapasitörler için alternatif bir elektrot malzemesi olarak kabul edilmiştir [15]. Co(OH)₂-bazlı malzemeler katmanlı yapılara sahiptir ve bu yapılar yüksek yüzey alanına sebep olur. Dolayısıyla iyonların elektrot yüzeyine taşınması ve elektrot yüzeyinden ayrılması hızlıdır [16]. Kobalt temelli malzemeler rutenyum temelli malzemelere göre çok daha ekonomik olması sebebiyle süperkapasitör uygulamalarında yaygın olarak çalışılmaktadır [17].

Elektrot malzemesi, süperkapasitörlerin genel elektrokimyasal performansını düzenlemede en önemli bileşenlerden biri olduğundan ve elektrodun yüzey alanının büyüklüğü kapasitansı önemli derecede etkilediğinden, bu çalışmada elektrot olarak daha yüksek yüzey alanına sahip nikel köpük kullanılmıştır [16]. Nikel köpük elektrotun elektrokimyasal özellikleri (spesifik kapasitans, güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu) artırılabilir. Bunun için iletken polimerler veya metaller/alaşımlar nikel köpük üzerine kaplanabilir. Bu çalışmanın temel amacı, bir nikel köpük elektrotu üzerine kararlı ve elektrokimyasal olarak aktif bir kobalt temelli kaplamayı elektrokimyasal olarak pirofosfat ortamından elde etmektir ve elde edilen bu elektrodun süperkapasitör uygulamasında kullanılmasını araştırmaktır. Kobalt, nikel köpük üzerine pirofosfat çözeltisi içinde sabit voltaj uygulanarak elde edildi. İndirgenecek metalin standart elektrot potansiyeline göre, metalin katot üzerinde birikmesi için hücreye belirli bir voltaj değeri uygulandı.

II. MALZEME VE METOT

A. Malzemeler

Potasyum pirofosfat (K₄P₂O₇, Sigma Aldrich, %98), potasyum hidroksit (KOH, Merck, %90) monopotasyum fosfat (KH₂PO₄, Sigma Aldrich, %99) ve kobalt (II) klorür heksahidrat (CoCl₂·6H₂O, Merck, %98) kimyasalları saflaştırılmadan doğrudan kullanıldı.

B. CoOx Filmin Elektrokimyasal Olarak Depolanması

Nikel köpük elektrodu üzerine kobalt temelli filmin depolanması elektrokimyasal yöntem ile gerçekleştirildi. Kobalt pirofosfat çözeltisi (50 mM CoCl₂, 0,7 M K₄P₂O₇ ve 0,07 M KH₂PO₄) saflaştırılmış su kullanılarak hazırlanmıştır. Kobaltın elektrokimyasal olarak elde edilmesinde karşıt elektrot olarak titanyum kaplı platin, çalışma elektrodu olarak nikel köpük elektrot ve referans elektrot olarak Ag/AgCl içeren üç elektrotlu bir sistem kullanılarak gerçekleştirildi. Nikel köpük çalışma elektrodu ve karşıt elektrot biriktirme işlemi sırasında paralel olarak yerleştirildi. Kobalt, 200 saniye boyunca -1,5 V uygulanarak potansiyostatik olarak depolandı. Kobalt film nikel köpük üzerine biriktirildikten sonra, elektrot saf suyla yıkandı ve kurutuldu. Tüm deneyler oda sıcaklığında (20 ± 2 °C) gerçekleştirildi.

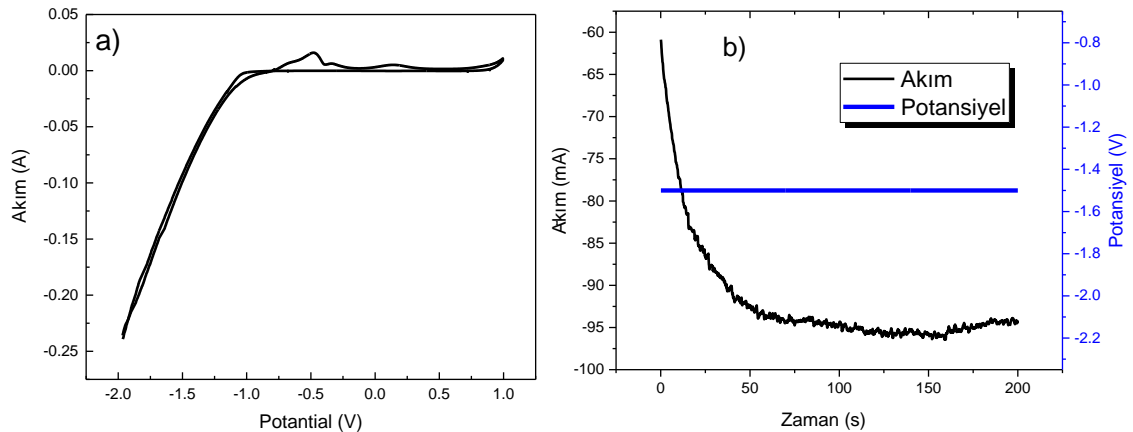
C. Elektrodun Karakterizasyonu

Kaplanmamış nikel köpük ve CoOx kaplanmış nikel köpüklerin yüzey morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (Zeiss Gemini SEM 300 FEGSEM, Carl Zeiss, Oberkochen, Almanya) ile incelendi. Tüm elektrokimyasal ölçümler, üç elektrotlu bir potansiyostat sistemi (Princeton Applied Research, VersaSTAT 3 AMETEK, Oak Ridge, TN, ABD) kullanılarak yapıldı. Üç elektrotlu elektrokimyasal ölçümler için kobalt kaplı nikel köpüğü doğrudan çalışma elektrodu, titanyum kaplı platin karşıt elektrot ve Ag/AgCl referans elektrodu olarak kullanıldı. Elektrolit olarak sulu 1 M KOH çözeltisi kullanıldı. Kobalt nikel köpük elektrodu üzerine katodik olarak elektrokimyasal yöntem ile depolandı. Bu filmler elektrokimyasal karakterizasyon için 1 M KOH içinde -0,4 V ila +0,4 V arasında tarandı. Elektrot dönüşümlü voltametri -0,4 V ile +0,4 V arasında farklı tarama hızlarında (5, 10, 20, 50 ve 100 mV s⁻¹) tarandı.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

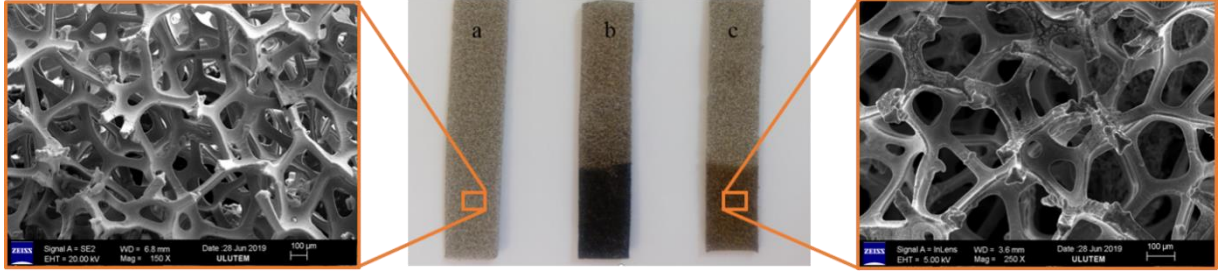
A. CoOx Filmin Nikel Köpük Yüzey Üzerine Sentezi

Kobalt film, pirofosfat ortamında (0,07 M KH₂PO₄ and 0,7 M K₄P₂O₇) 200 saniye boyunca -1,5 V potansiyel uygulanarak bir nikel köpük elektrodu üzerine potansiyostatik olarak depolandı. Şekil 1 a, 25 °C'de pirofosfat çözeltisindeki kobaltın nikel köpük elektrodu üzerine depolanmasının dönüşümlü voltametri eğrisini göstermektedir. Kobaltın nikel köpük elektrodu üzerine depolanması, yaklaşık -1,3 V'da başlar; bu, daha fazla negatif voltaj uygulandığında kobalt birikmesine neden olabilir [17]. Şekil 1 b, 200 saniye boyunca -1,5 V uygulanarak elde edilen kobalt temelli filmin birikmesi için kronoamperometrik verileri göstermektedir. Şekil 1 b'nin grafiğindeki dalgalanmalar kobalt biriktirme sırasında nikel köpük elektrotunda hidrojen gazı çıkışının sonucudur. Kobaltın elektrokimyasal olarak depolanması hidrojenin ortaya çıkması ile oluşur [18].



Şekil 1. a) 50 mM CoCl₂ içeren pirofosfat çözeltisi içerisindeki nikel köpük elektrodunun, Ag/AgCl referans elektroduna karşı 50 mV s⁻¹ tarama hızında dönüşümlü voltamogram eğrisi. b) Pirofosfat ortamında bulunan nikel köpük elektrot üzerine -1,5 V uygulanarak elde edilen kobalt filmin kronoamperometrik eğrisi.

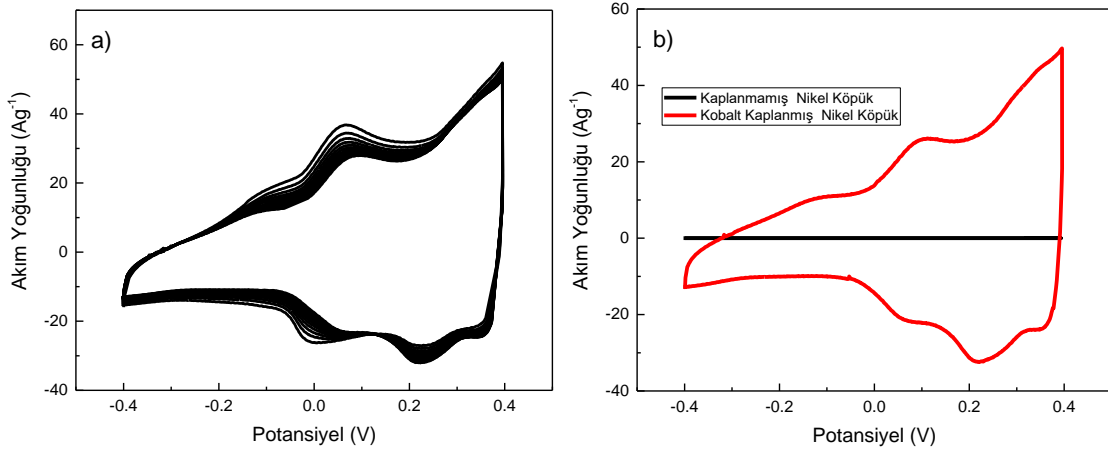
Şekil 2. a kaplanmamış nikel köpük elektrotunun yüzey görüntüsünü göstermektedir. Şekil 2. b 200 saniye boyunca -1,5 V potansiyel uygulanarak elde edilen kobalt depolanmış nikel köpük yüzeyinin görüntüsünü göstermektedir. Şekil 2. c potansiyel uygulanarak elde edilen kobalt depolanmış nikel köpük elektrotunun 1 M KOH elektrolitinden çıkarıldıktan sonraki yüzey görüntüsünü göstermektedir. Kaplanmamış ve kobalt kaplanmış nikel köpük elektrotların SEM görüntüleri de Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. a) Nikel köpük elektrot b) -1,5 V potansiyel uygulanarak elde edilen kobalt temelli nikel köpük elektrot c) elde edilen kobalt filmin, 1 M KOH elektroliti içerisindeki formunu göstermektedir.

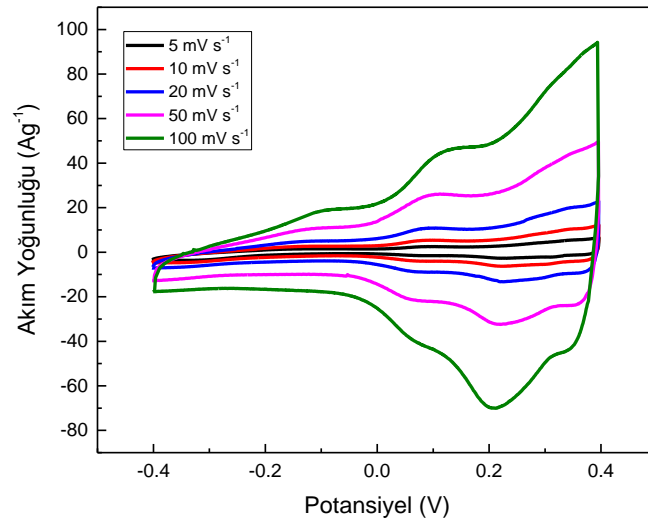
B. Elektrotun Karakterizasyonu

Pirofosfat ortamında elde edilen kobalt temelli kaplanmış nikel köpük elektrot, filmin elektrokimyasal performansını belirlemek için KOH elektroliti içerisine aktarıldı. Şekil 3 kobalt temelli filmin 1 M KOH içinde -0,4 V ve +0,4 V arasında 50 mV s^{-1} tarama hızında dönüşümlü voltamogram eğrilerini göstermektedir. Kobalt temelli film, dönüşümlü voltametri tekniği ile analiz edildiğinde yaklaşık 15 taramadan sonra kararlı olduğu görüldü (Şekil 3 a). Kobalt temelli nikel köpük elektrodunun çevrimi, kısa sürede (birkaç döngüde) gerçekleşti, çünkü hem dönüşümlü voltametrede hem de kobalt film elde edilirken kullanılan elektrolitler, sulu çözeltiler içermektedir. Sulu elektrolitler, iyonik sıvı elektrolitlere kıyasla daha kısa döngü kararlılığına sahiptir [19]. Sulu elektrolitler, (H_2SO_4 , KOH, Na_2SO_4 vb. gibi) organik elektrolitlere kıyasla düşük maliyetli, yüksek iyonik iletkenlik, toksik olmayan ve kullanım kolaylığı gibi avantajlara sahiptir. Şekil 3 b, 15 döngüden sonra kararlı olan kobalt kaplanmış nikel köpük elektrodunun (kırmızı çizgi) ve kaplanmamış nikel köpük elektrodunun (siyah çizgi) 1 M KOH içindeki dönüşümlü voltametre sonuçlarını göstermektedir. Kobalt film, elektrokimyasal olarak aktiftir ve KOH elektrolitinde -0,4 V ile +0,4 V arasında kararlıdır. Kaplanmış elektrot 0 ile 0,4 V arasında taranabilir fakat redoks tepe noktalarının daha geniş olarak görülmesi için -0,4 ile 0,4 V arasında taranmıştır. Şekil 3 b incelendiğinde, mevcut elektrot olarak kullanılan kaplanmamış nikel köpük elektrodun (siyah çizgi) 1 M KOH elektrolitinde güçlü yükseltgenme ve indirgeme tepelerine sahip olmadığı gözlemlendi. Aksine, kobalt depolanmış nikel köpük elektrot, (kırmızı çizgi) belirgin yükseltgenme ve indirgenme tepe noktalarına sahiptir. Nikel köpük elektrodun (siyah çizgi, Şekil 3 b) dönüşümlü voltametredeki akım miktarı, kobalt temelli nikel köpük elektrot akım miktarıyla kıyaslandığında oldukça az olduğu bulundu. Şekil 3 a ve b, kobaltın +0,1 V’da yükseltgenme tepe noktasının ve 0,22 V ile 0,18 V’da indirgenme tepe noktalarının olduğunu göstermektedir.



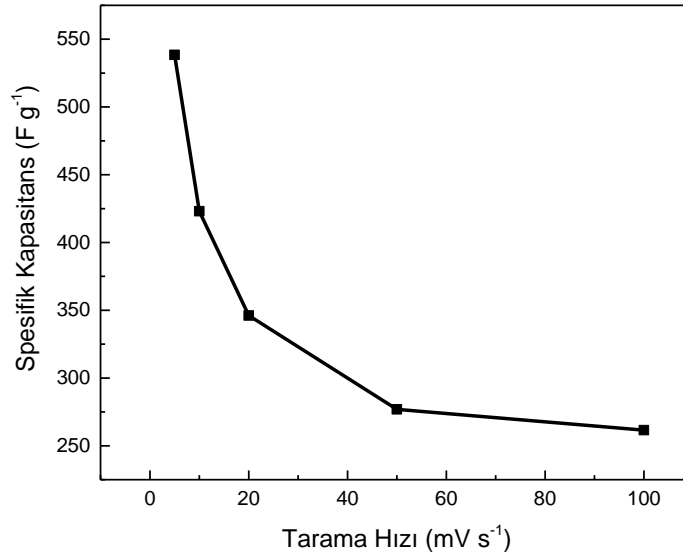
Şekil 3. a) Kobalt depolanmış nikel köpük elektrodunun 50 mV s^{-1} tarama hızındaki 1 M KOH elektrolitindeki dönüşümlü voltametri eğrisi. b) Nikel köpük elektrodunun (siyah çizgi) ve kobalt kaplanmış nikel köpük elektrodunun (kırmızı çizgi) KOH elektroliti içerisindeki dönüşümlü voltametri eğrisi ($v = 50 \text{ mV s}^{-1}$).

Şekil 4 farklı tarama hızlarında ($5, 10, 20, 50$ ve 100 mV s^{-1}) 1 M KOH elektroliti içerisinde kobalt temelli filmin, dönüşümlü voltametri eğrilerini göstermektedir. Eğriler yükseltgenme ve indirgenme tepe noktalarına sahiptirler. Elektriksel Çift Katmanlı Süperkapasitörlere potansiyel uygulandığında iyonlar yüzeye yapışırken, pseudo süperkapasitörlerde faradaik reaksiyonlar (redoks reaksiyonları) gerçekleşir [20]. Faradaik reaksiyon oluşturan malzemeler, iletken polimerler ve metal oksit/hidroksitlerdir. Metal temelli pseudo kapasitör elektrotlarına örnek olarak V_2O_5 [21], Ni(OH)_2 [22], MnO_2 [23] ve CoOOH bazlı malzemeler verilebilir. Elektriksel Çift Katmanlı Süperkapasitör elektrotlarının dönüşümlü voltametri grafiği dikdörtgen şeklindeyken, metal oksitlerin grafiği tepe noktalarına sahip olabilirler. Şekil 4'te sunulan veriler yükseltgenmiş formun $+0,4 \text{ V}$ 'da ve indirgenmiş formun $-0,4 \text{ V}$ 'da gerçekleştiğini göstermektedir. Akım yoğunluğu, artan tarama hızı ile artmaktadır. Kobalt temelli filmin çeşitli formlarının varlığı, redoks reaksiyonlarının potansiyel piklerinin değişmesine katkıda bulunur ve bu literatürle genel olarak uyumludur [24].



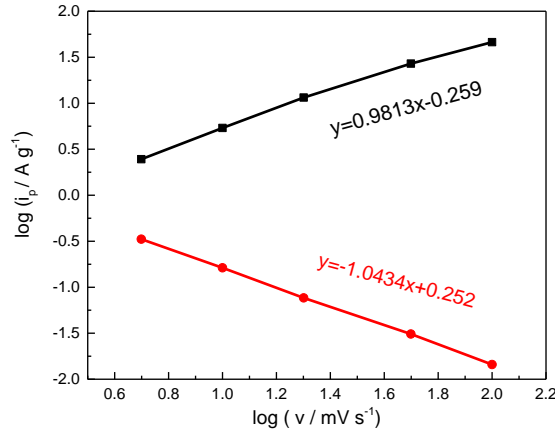
Şekil 4. $-1,5 \text{ V}$ uygulayarak elde edilen kobalt temelli nikel köpük elektrodun 1 M KOH elektroliti içerisinde $5, 10, 20, 50$ ve 100 mV s^{-1} tarama hızlarındaki dönüşümlü voltametri eğrileri.

Çeşitli tarama oranlarında yüksek kapasitans tutma, enerji depolama malzemelerinin yüksek güç yoğunluklarının karşılamasında önemli bir özelliktir. Şekil 5 farklı tarama hızlarında (5, 10, 20, 50 ve 100 mV s^{-1}) kobalt temelli nikel köpük elektrodunun spesifik kapasitansını göstermektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi kobalt temelli nikel köpük elektrodun kapasitansı tarama hızı ile ters orantılıdır. Tarama hızını azaltmak, elektrolitin filme nüfuz etme süresini artırır ve böylece elektrot malzemesinin iç yüzeyi ile daha fazla temasta olur. Bu nedenle, elektrot-elektrolit ara yüzünde daha fazla iyon/elektron reaksiyona girebilir ve daha uzun zamanda daha yüksek kapasitansa neden olabilir. 5 mV s^{-1} 'lik bir tarama hızında, gözlenen kapasitans, elektrolit ve elektrotun uzun süre birbiriyle temas ettiğinden 538 F g^{-1} 'dir çünkü elektrotun yüzeyinde iyonlar daha fazla taşınabilir. 100 mV s^{-1} tarama hızında ise daha kısa süreli çözelti teması nedeniyle spesifik kapasitans 207 F g^{-1} 'a düşmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen kobalt temelli elektrodun süperkapasitör uygulamalarındaki performansı literatürdeki diğer kobalt temelli elektrotların performansı ile kıyaslanması Tablo 1'de verilmiştir.



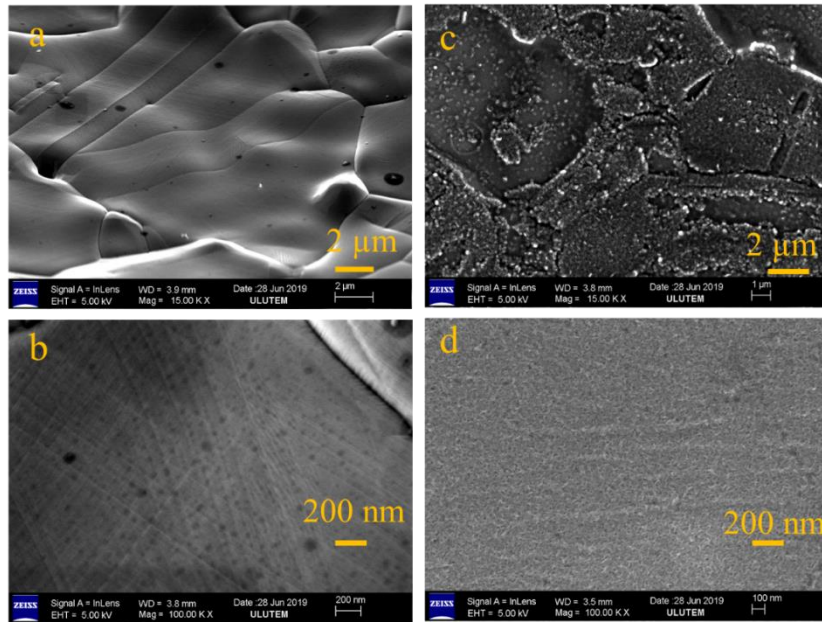
Şekil 5. Kobalt temelli nikel köpük elektrodunun spesifik kapasitansının tarama hızına bağlı değişimi.

Cottrell denklemi, elektronun reaksiyon mekanizmasını veya elektrolit ve elektrot yüzeyi arasındaki iyon transferini anlamada kullanılabilir. Kobalt temelli nikel köpük elektrotunun 1 M KOH içindeki hız sınırlayıcı reaksiyonunu incelemek için bir $\log(v)$ ve $\log(i_p)$ grafiği çizildi. Şekil 6'te kullanılan v , tarama hızını sembolize ederken i_p yükseltgenme ve indirgenme tepe noktalarının akım değerlerini göstermektedir. Bu değerler Şekil 4'te gösterilen maksimum tepe noktalarından alınmıştır. $\log(v)$ veya $\log(i_p)$ eğimi 0,5'ten düşük olduğunda reaksiyon kinetik olarak sınırlanır. Eğim 0,5 olduğunda, reaksiyon tamamen difüzyon sınırlıdır. Eğim 1'e eşit ise, reaksiyon mekanizması tamamen yüzey reaksiyonu sınırlıdır [25]. Yükseltgenme ve indirgenme tepeleri için hesaplanan $\log(v)$, $\log(i_p)$ eğimi, sırasıyla 0.98 ve 1.04'dir. Böylece, kobalt kaplanmış nikel köpük ile KOH elektroliti arasında gerçekleşen redoks reaksiyonu genel itibariyle yüzey sınırlı bir mekanizmaya sahiptir.



Şekil 6. Farklı tarama hızlarının logaritmasının maksimum yükseltgenme ve indirgenme tepe noktalarının logaritmasına karşı grafiği. Tepe noktalarının değerleri Şekil 4'ten alınmıştır.

Kaplanmamış nikel köpük elektrotun (Şekil 7 a ve 7 b) ve CoOx depolanmış nikel köpük elektrotunun (Şekil 7 c ve 7 d) yüzey morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Filmlerin morfolojik görüntüleri iki farklı çözünürlükte elde edildi (15000X ve 100000X büyütme). Şekil 7 a ve b'de kaplanmamış nikel köpük elektrotunun büyütülmüş SEM görüntüsü yüzeyin temiz ve pürüzsüz olduğunu göstermektedir. Nikel köpük üzerine -1,5 V uygulanarak elde edilen CoOx filmin yüzey görüntüsü Şekil 7 c ve d'de verilmektedir. Biriktirme işleminden sonra, CoOx filmin nikel köpük yüzeyine düzgün bir şekilde dağıldığı görülebilir. Bu morfolojinin varlığı, kobalt temelli kaplamanın toplanmış parçacıklardan oluştuğunu ve nikel köpük yüzeyine biriktiğini gösterir.



Şekil 7. (a) ve (b) kaplanmamış nikel köpük elektrotunun; (c) ve (d) kobalt kaplanmış nikel köpük elektrotunun SEM görüntüleri.

Tablo 1. Süperkapasitör uygulamalarında kullanılan kobalt temelli elektrotların performansları.

Elektrot	Elde Etme Metodu	Kapasitans	Döngü Kararlılığı	Referans
Nikel köpük elektrot üzerinde CoOx	Elektrokimyasal depolama	538 F g ⁻¹ , 5 mV s ⁻¹	1000 döngüden sonra % 89	Bu çalışma
CoOOH + CNT	İki adımlı hidrotermal ve yükseltgenme methodu	270 F g ⁻¹ , 5 mV s ⁻¹	10000 döngüden sonra % 79	[26]
CoOOH on Ni foam	Hidrotermal sentez	198 F g ⁻¹	5000 döngüden sonra % 83	[27]
Co ₂ O ₃ on NiO	Elektrodepolama	345 F g ⁻¹ , 20 mV s ⁻¹	200 döngüden sonra >% 50	[28]
Bakır üzerine Co + Co(OH) ₂	Elektrodepolama	549 F g ⁻¹ , 5 mV s ⁻¹	450 döngüden sonra % 84	[29]
Grafit üzerine CoOOH + Co(OH) ₂	Elektrodepolama ve baz ortamında oksitleme	886 F g ⁻¹ , 5 mV s ⁻¹	90.1 % after 1000 cycles	[30]

IV. SONUÇLAR

Süperkapasitörlerin performansını belirlemede en önemli faktörlerden biri kullanılan elektrot malzemelerin yüksek yüzey alanına sahip olmasıdır. Bu çalışmada, pirofosfat ortamındaki kobalt, 200 saniye boyunca nikel köpük elektroduna -1,5 V uygulanarak potansiyostatik olarak depolandı. Daha sonra kobalt depolanmış nikel köpük elektrodu, 1 M KOH elektrolitine aktarıldı. Kobalt temelli film, 1 M KOH içerisinde +0,4 V'da yükseltgendi ve -0,4 V'da indirgendi. Elde edilen film SEM ile karakterize edildi. Kobalt depolanmış nikel köpük elektrot 5 mV s⁻¹ tarama hızında 538 F g⁻¹ spesifik kapasitansa sahiptir. Kobalt temelli elektrot ve KOH elektroliti arasındaki reaksiyon genel olarak yüzey kontrollü mekanizmadan oluşmaktadır. Gözenekli nikel köpük yüzeyindeki kobalt temelli elektrot kolayca üretilebilir. Nikel köpük altlığın elektrokimyasal olarak kobaltla kaplanmasıyla süperkapasitörler için alternatif bir elektrot malzemesi elde edilebilir.

TEŞEKKÜR

Perihan Yılmaz Erdoğan ve Naime Özdemir doktora bursu için YÖK 100-2000 programına teşekkür ederler. Yazarlar, Gaziantep Üniversitesi BAP birimine FEF.DT.19.40 kodlu proje desteği için teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- [1] S. R. Sharvini, Z. Z. Noor, C. S. Chong, L. C. Stringer, and R. O. Yusuf, "Energy consumption trends and their linkages with renewable energy policies in East and Southeast Asian countries: Challenges and opportunities," *Sustain. Environ. Res.*, vol. 28, no. 6, pp. 257–266, 2018.
- [2] S. Najib and E. Erdem, "Current progress achieved in novel materials for supercapacitor electrodes: mini review," *Nanoscale Adv.*, vol. 1, no. 8, pp. 2817–2827, 2019.
- [3] A. Noori, M. F. El-Kady, M. S. Rahmanifar, R. B. Kaner, and M. F. Mousavi, "Towards establishing standard performance metrics for batteries, supercapacitors and beyond," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 48, no. 5, pp. 1272–1341, 2019.
- [4] L. H. Saw *et al.*, "Numerical modeling of hybrid supercapacitor battery energy storage system for electric vehicles," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2750–2755, 2019.
- [5] Y. Chai, Z. Li, J. Wang, Z. Mo, and S. Yang, "Construction of hierarchical holey graphene/MnO₂ composites as potential electrode materials for supercapacitors," *J. Alloys Compd.*, vol. 775, pp. 1206–1212, 2019.
- [6] Xian Jian *et al.*, "Carbon-Based Electrode Materials for Supercapacitor: Progress, Challenges and

- Prospective Solutions,” *J. Electr. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 75–87, 2016.
- [7] K. Wang, H. Wu, Y. Meng, and Z. Wei, “Conducting polymer nanowire arrays for high performance supercapacitors,” *Small*, vol. 10, no. 1, pp. 14–31, 2014.
- [8] R. S. Kate, S. A. Khalate, and R. J. Deokate, “Overview of nanostructured metal oxides and pure nickel oxide (NiO) electrodes for supercapacitors : A review,” *J. Alloys Compd.*, vol. 734, pp. 89–111, 2018.
- [9] Y. Li *et al.*, “Ni-Co sulfide nanowires on nickel foam with ultrahigh capacitance for asymmetric supercapacitors,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 18, pp. 6540–6548, 2014.
- [10] Y. Sui, Y. Zhang, H. Hu, Q. Xu, F. Yang, and Z. Li, “High energy density asymmetric supercapacitor based ZnS/NiCo₂S₄/Co₉S₈ nanotube composites materials,” *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 5, no. 12, p. 1800018, 2018.
- [11] Jayalakshmi, M., & Balasubramanian, K. (2008). Simple capacitors to supercapacitors-an overview. *Int. J. Electrochem. Sci*, vol. 3, no. 11, pp. 1196-1217, 2008..
- [12] X. Wang, A. Sumboja, M. Lin, J. Yan, and P. S. Lee, “Enhancing electrochemical reaction sites in nickel–cobalt layered double hydroxides on zinc tin oxide nanowires: a hybrid material for an asymmetric supercapacitor device,” *Nanoscale*, vol. 4, no. 22, pp. 7266–7272, 2012.
- [13] I. Shakir, M. Shahid, U. A. Rana, I. M. Al Nashef, and R. Hussain, “Nickel–Cobalt layered double hydroxide anchored zinc oxide nanowires grown on carbon fiber cloth for high-performance flexible pseudocapacitive energy storage devices,” *Electrochim. Acta*, vol. 129, pp. 28–32, 2014.
- [14] D. Yang and M. I. Ionescu, *Metal Oxide–Carbon Hybrid Materials for Application in Supercapacitors*, in *Metal Oxides in Supercapacitors*. Elsevier, pp. 193-218. 2017.
- [15] Z. Xun, C. Cai, W. Xing, and T. Lu, “Electrocatalytic oxidation of dopamine at a cobalt hexacyanoferrate modified glassy carbon electrode prepared by a new method,” *J. Electroanal. Chem.*, vol. 545, pp. 19–27, 2003.
- [16] V. Gupta, S. Gupta, and N. Miura, “Potentiostatically deposited nanostructured Co_xNi_{1-x} layered double hydroxides as electrode materials for redox-supercapacitors,” *J. Power Sources*, vol. 175, no. 1, pp. 680–685, 2008.
- [17] C. Zhao and W. Zheng, “A review for aqueous electrochemical supercapacitors,” *Front. Energy Res.*, vol. 3, p. 23, 2015.
- [18] C. Lupi, A. Dell’Era, and M. Pasquali, “Nickel–cobalt electrodeposited alloys for hydrogen evolution in alkaline media,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 2101–2106, 2009.
- [19] Q. Li, J. Chen, L. Fan, X. Kong, and Y. Lu, “Progress in electrolytes for rechargeable Li-based batteries and beyond,” *Green Energy Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 18–42, 2016.
- [20] G. Wang, L. Zhang, and J. Zhang, “A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 41, no. 2, pp. 797–828, 2012.
- [21] Q. Hu *et al.*, “Intracellular polymer substances induced conductive polyaniline for improved methane production from anaerobic wastewater treatment,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 6, pp. 5912–5920, 2019.
- [22] T. M. Masikhwa, M. J. Madito, D. Momodu, A. Bello, J. K. Dangbegnon, and N. Manyala, “High electrochemical performance of hybrid cobalt oxyhydroxide/nickel foam graphene,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 484, pp. 77–85, 2016.

- [23] S. R. Majid, "Green synthesis of in situ electrodeposited rGO/MnO₂ nanocomposite for high energy density supercapacitors," *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 16195, 2015.
- [24] S. H. Kim, Y. Il Kim, J. H. Park, and J. M. Ko, "Cobalt-manganese oxide/carbon-nanofiber composite electrodes for supercapacitors," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 4, pp. 1489–1496, 2009.
- [25] Q. Mahmood *et al.*, "Transition from Diffusion- Controlled Intercalation into Extrinsicly Pseudocapacitive Charge Storage of MoS₂ by Nanoscale Heterostructuring," *Adv. Energy Mater.*, vol. 6, no. 1, p. 1501115, 2016.
- [26] L. Zhu, W. Wu, Y. Zhu, W. Tang, and Y. Wu, "Composite of CoOOH nanoplates with multiwalled carbon nanotubes as superior cathode material for supercapacitors," *J. Phys. Chem. C*, vol. 119, no. 13, pp. 7069–7075, 2015.
- [27] C. J. Raj *et al.*, "Rapid hydrothermal synthesis of cobalt oxyhydroxide nanorods for supercapacitor applications," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 747, pp. 130–135, 2015.
- [28] B. Sarma, R. S. Ray, S. K. Mohanty, and M. Misra, "Synergistic enhancement in the capacitance of nickel and cobalt based mixed oxide supercapacitor prepared by electrodeposition," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 300, pp. 29–36, 2014.
- [29] A. Yavuz, M. Y. Hacıbrahimoğlu, and M. Bedir, "Synthesis and characterisation of Co-Co(OH)₂ composite anode material on Cu current collector for energy storage devices," *Mater. Res. Express*, vol. 4, no. 4, 2017.
- [30] A. Yavuz, P. Y. Erdogan, N. Ozdemir, H. Zengin, G. Zengin, and M. Bedir, "Electrochemical synthesis of CoOOH–Co(OH)₂ composite electrode on graphite current collector for supercapacitor applications," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 30, no. 20, pp. 18413–18423, 2019.

Araştırma Makalesi - Research Article

Dijital Görüntüler Kullanılarak Kan Grubunun Görüntü İşleme Tabanlı Tespiti

Hilal Atıcı^{1*}, Hasan Erdiñç Koçer², Saadet Kader³

Geliş / Received: 14/11/2019

Revize / Revised: 02/07/2020

Kabul / Accepted: 08/07/2020

ÖZ

Kan gruplandırılması, temel tıbbi prosedürlerin çoğu için ilk ve en önemli gerekliliktir. Kan grubunu tespit etmede kullanılan geleneksel teknikte uzman, kan örneğine anti-serum madde karıştırarak kandaki renk ve biçim değişikliğini izler ve kan grubu ile Rh faktörünü belirler. Bu işlem uzman tarafından gün boyunca yapılmaktadır ve yorgunluk, gözden kaçırma gibi sebeplerden dolayı hataya açıktır. Bu çalışmada, görüntü işleme teknikleri kullanılarak kan grubunun otomatik olarak tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için gerçek hasta kanlarının dijital görüntüleri üzerinde bir dizi görüntü işleme tekniği uygulanmıştır. Alınan kan görüntüleri üç bölüme ayrıldıktan sonra öncelikle RGB-Gri seviye-Siyah/Beyaz dönüşümü yapılmıştır. Ardından morfolojik işlemler uygulanarak kan bölgesi segmente edilmiş ve kenar sınır çizgileri işaretlenmiştir. Son aşamada ise beyaz piksel yoğunluğu, bölge içerisindeki nesne sayısı ve kenar piksel sayısı tespit edilerek kan grubu ve Rh faktörü belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Kan Grubu Tespiti, Görüntü İşleme, Segmentasyon, Sınıflandırma*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: hilalatici@eskisehir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1859-8085>)

Bilgisayar Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye

²İletişim: ekocer@selcuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-0799-2140>)

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye

³İletişim: saadetskader@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-0646-946X>)

Karapınar Devlet Hastanesi, Konya, Türkiye

Determination of Blood Group by Image Processing Using Digital Images

ABSTRACT

Blood grouping is the first and most important requirement for most basic medical procedures. The expert in the conventional art used to detect blood type monitors the color and shape change in the blood by mixing anti-serum substance into the blood sample and determines the blood group and Rh factor. This is done by the expert throughout the day and is open to errors due to tiredness and oversight. In this study, it was aimed to determine blood group automatically by using image processing techniques. For this purpose, a series of image processing techniques have been applied on digital images of real patient blood. After the blood samples were divided into three parts, firstly RGB-Gray level-Black/White conversion was performed. Subsequently, morphological procedures were performed, and the blood region was segmented and border lines were marked. In the last stage, the white pixel density, the number of objects in the region, and the number of edge pixels were determined and blood group and Rh factor were determined.

Keywords- *Blood Group Detection, Image Processing, Segmentation, Classification*

I. INTRODUCTION

Blood is one of the most important elements of the human body, which acts as the main connective tissue and holds the circulation of many essential components, such as oxygen and various nutrients.

The traditional method of detecting blood type is usually plate test and tube test [5]. Both are performed under complete analog procedures with human observation. It is insufficient to perform the most basic and necessary medical procedure in a completely analogous environment. There are also several techniques, such as microplate testing and gel centrifugation [5,7]. These procedures are expensive and need to be performed by people with strong skills and some special equipment.

With the developing technology, the use of modern devices in healthcare has increased. Therefore, the use of image processing techniques in medicine has become widespread. These techniques provide great convenience to physicians in terms of time, cost, treatment, and diagnosis.

Basically, the process of blood group analysis depends on the deposition of a sample of blood. The blood of a patient is mixed with three types of antigen; antigen A, antigen B, and antigen D. Agglutination in any blood sample ensures the positivity of the blood belonging to the group of interest.

Agglutination can also be detected by human eyes, but errors in these procedures may occur. Incorrectly detected blood type may cause incorrect medical procedures. For this reason, it is important that the blood type determination be determined perfectly [4,6].

Image segmentation is one of the basic techniques of image processing. In segmentation, a large image is divided into several sub-images. When the algorithms are run separately on the images in the subsections, the calculations are more pronounced and the result becomes more precise.

Another important image processing technique is the thresholding method. The threshold divides any image into two basic parts. In some cases, segmented images may become blurred, and important information that may need to be extracted may not be extracted. Thresholding is very useful in such cases [2].

In this study, a blood group determination system was proposed which gave a definite result in a short time. The traditional medical laboratory procedure concludes by looking at a reaction output consisting of the following steps:

- Blood samples are placed on a white surface,
- Anti- serums are dripped onto blood samples,
- Blood samples and anti-serums are mixed,
- Wait until the reaction is carried out,
- The blood type is determined by looking at the output.

This process takes time and needs an expert to perform this operation. Therefore, it is important to realize an expert system.

In a study, the blood group was determined by applying image processing techniques on the digital image taken with the serum dripped onto the blood. Firstly, the images were converted to gray level and then converted to binary format. After this image was divided into three parts, each one was applied a Canny edge detection algorithm. With the tests, the threshold value was determined as 32, and it was determined whether there was a sedimentation in the blood according to this value. The blood group was determined using the latest classification algorithm [6]. In this study, the blood group was classified according to three parameters. These parameters are; the number of edges, the number of white pixels and the total number of elements in each segmented image.

In 2016, a study was conducted on blood group detection; white blood cell (WBC) and red blood cell (RBC) number determination. In this study, digital blood images were used for blood group detection and microscopic blood images were used for WBC and RBC counting. Image processing techniques, such as

segmentation, morphological processes, and Circular Hough Transform were used in the study. The system achieved an average of 90% accuracy rate [11].

In another study, digital blood images were first converted from RGB format to HSV format and then to binary format. Morphological procedures were applied to clear noisy data on the binary image. Histogram information of the images was extracted. The images are divided into three parts according to histogram information. Feature extraction was applied to these parts. Parts were classified according to white pixel density and number of objects [1].

In a study, a method based on the processing of images obtained during blood group detection was developed. Image processing techniques, such as threshold and morphological processes are used. The developed automatic method determines the blood group using image processing techniques. The methods and advantages of human blood group determination using SIFT transformation, and SVM classifier are discussed [8].

In 2018, a study was conducted on the correct and rapid identification of the blood group based on image processing technology. First, image processing technique, such as the HSV brightness plane was used to detect the background color. Then morphological operations were done on the images. In this method, clusters are classified to identify the blood group by determining the area of a cluster. The method was able to classify the blood group quickly and accurately [9].

In a study conducted in 2018, an automatic system that determines the blood group using image processing techniques was developed. Using LABVIEW and IMAQ vision, the blood group is identified. The blood sample and the antigen are mixed and then the image of the mixture is captured. Based on the occurrence of agglutination reaction, the blood group of the patient is identified. The mixing of antigen and the blood samples is done manually, so this system is not fully automated [10].

In this study, a study was performed on a patient dataset collected from Karapınar State Hospital Laboratory. The data set was received via a camera with a resolution of 12 MP. The images obtained have a resolution of 1500x400. The data set consists of a total of 52 images obtained from previously tested blood samples, and the blood group of these images is already known. In this data set, at least three and at most five images were taken from each type of blood group.

II. MATERIALS AND METHODS

In this study, automatic blood group detection by using image processing techniques with laboratory technician to blood group detection technique is discussed. What the technician needs to do is to put the blood on the white plate and mix it properly with the anti-serum and finally take an image.

The image taken from the environment where the objects are located is first converted to gray level and then converted to binary format. Morphological procedures are applied to eliminate the noise on the image. After prewitt edge detection algorithm was applied to the image, segmentation was performed with BoundingBox. After the feature extraction operations were applied to the separated image, classification was applied according to these properties.

The main steps in this application will be as follows;

1. Image Capture
2. Image Preprocessing and Segmentation
3. Determination of Blood Type

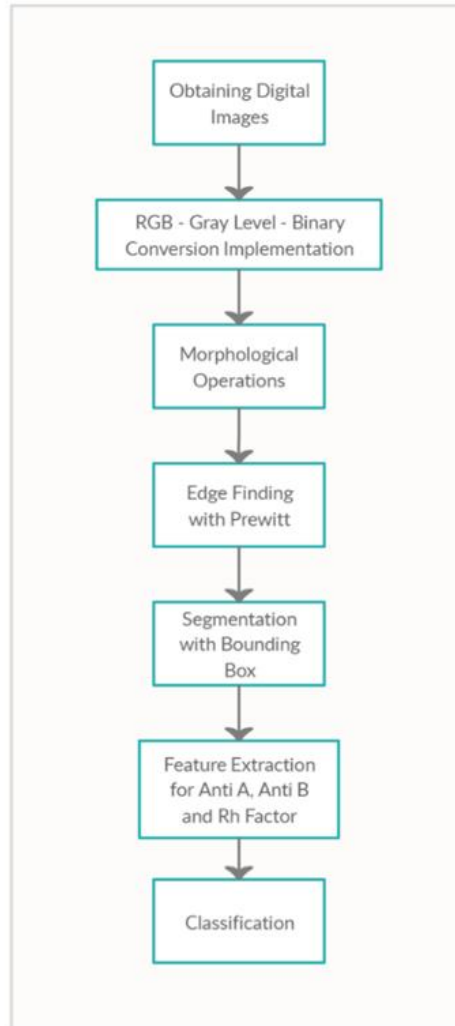


Figure 1. Stages of the proposed system

A. Image Acquisition

Images of the test slides were taken using a digital camera as shown in Figure 2. Plates contain blood sample mixed with anti-serums. Images were used in the application for further processing.



Figure 2. Anti-serum blood image obtained in the laboratory

B. Preprocessing

The preprocessing step involves resizing the image to a specific format. It involves converting the image from RGB to gray scale, converting the gray scale to binary image, and then segmenting the processed image for post-processing using advanced morphological procedures.

1) *Gray Scale Conversion*: In general, the grayscale image shows the image in which each of its pixels represents a certain amount of light range. The grayed-out image of Figure 2 is shown in Figure 3.

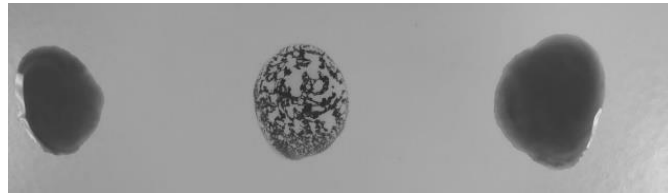


Figure 3. Converting image to gray level

The process of converting a color numeric image into a gray-toned image is actually the scaling of the gray-toned images that correspond to each color band specified in the RGB color model. In this sense, the scaling process performed by sticking to the brightness values of the color image;

$$\text{Gray Value} = 0.299xR + 0.587xG + 0.114xB \quad (1)$$

it is expressed with. With the equation (1), the gray-tone equivalent of the color image is obtained.

2) *Binary Transformation*: The image was converted to a binary format after being converted to gray level (Figure 4).

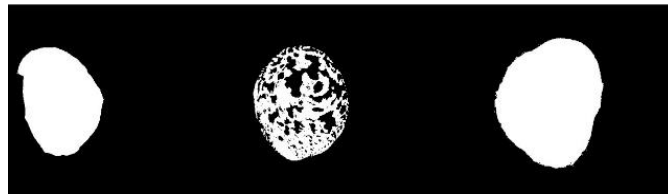


Figure 4. Converting an image to binary format

In the binary transformation stage, the color value of each pixel in the image is compared with a certain threshold value. If this is below the threshold value, one color is assigned, and if above, another color is assigned. When passing a grayscale image through this filter, it is assigned 0-black if the color value is equal to or below a threshold value of 128, and 1-white if the threshold is above the value. This process can be shown mathematically as follows;

$$f(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{if } g(x,y) < T = 128 \\ 1 & \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

3) *Morphological Operations*: Some basic morphological procedures were performed on the binary image to correct any defects and to better manipulate the image. At this stage, small particles, noise, unwanted situations on the image were deleted. Morphological process on the same image first dilation followed by erosion. Dilation is a morphological process used to magnify or emphasize objects in binary images. Dilation process;

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b \quad (3)$$

it is expressed by the formula.

In the erosion process, the pixels within the area specified according to the parameters are abraded, and the distorted image, called noisy, is cleaned from noise. Erosion process;

$$A \ominus B = \bigcap_{b \in B} A_{-b} \quad (4)$$

it is expressed by the formula.

4) *Segmentation*: Segmentation is the process of dividing a digital image into multiple segments within pixel sets. Dilate operation on the image filled the gaps in the image. Then clear particles filled with voids were obtained (Figure 5.).

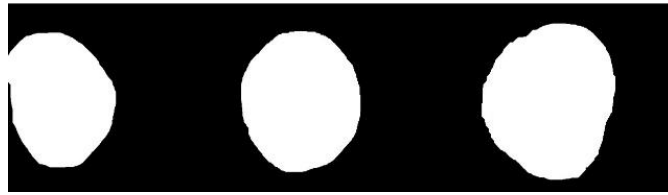


Figure 5. Filling the gaps in the image by dilation

After filling the gaps in the image, the edges in the image were determined by prewitt edge finding method. Boxes surrounding objects in the drawn image were detected.

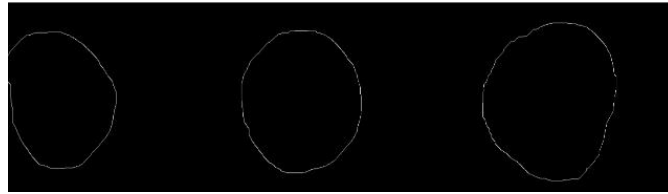


Figure 6. Finding the edges of the image

Zoning function was used to divide the image with edges.

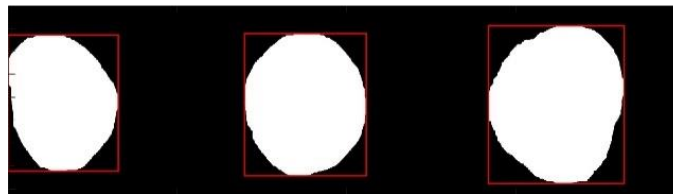


Figure 7. Bounding Box

The largest frames were used for segmentation.

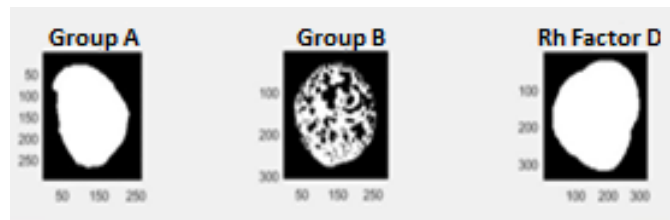


Figure 8. (a) Group A, (b) Group B, (c) Rh Factor group segmentation of blood image

C. Blood Group Determination

The blood group is determined using three features from the segmented image indicated below;

- The intensity of the white pixels of each segmented region (the area of the area consisting of white pixels) is calculated in the first place,
- And then calculated the total number of objects (elements) in each partitioned image,
- The number of edges in each last split image is determined.

These three characteristics clearly define that the distorted blood region has fewer white pixels (meaning less red components), more elements in the image, and more edges.

Using these features, distorted portions of the segmented images are easily detected. Figure 9 shows the original image and segmented version.

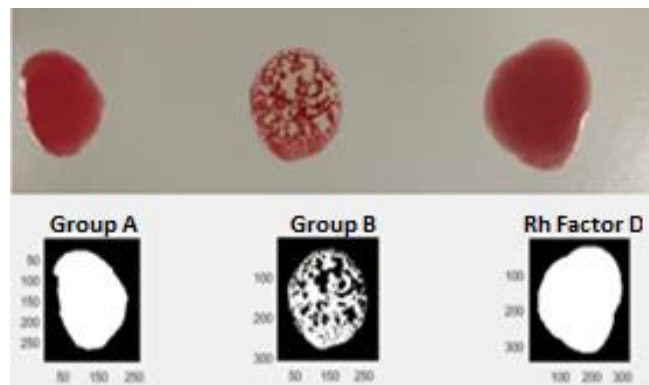


Figure 9. Original and segmented image of type B Positive Blood Group

In Figure 10, the Prewitt edge detection technique was applied to each of the partitioned binary images. When this technique is applied, the number of edges formed is used in the classification process.

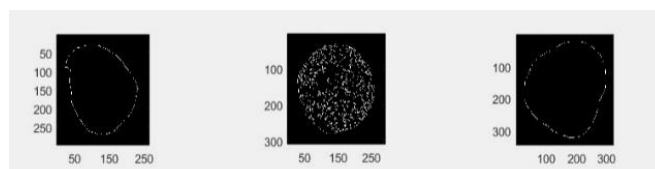


Figure 10. Application of Prewitt edge detection technique to blood image in (a) Group A, (b) Group B, (c) Rh Factor group

Table I shows the white pixel density (number of white pixels), number of objects (Red blood cell regions), and number of edges in each of the above segmented sections of images. Here it refers to those shown as dark regions without disruption.

By careful examination, a threshold can be determined on these three properties to help identify the region with or without distortion. As a result of the experiments, the threshold value for white pixel density is 20000, the threshold value for the number of objects is 5, and the threshold value for the number of edges is 32.

Table 1. White pixel density in image – number of objects – number of edge

	<i>Bölge</i>	<i>A+</i>	<i>A-</i>	<i>B+</i>	<i>B-</i>	<i>AB+</i>	<i>AB-</i>	<i>0+</i>	<i>0-</i>
<i>White Pixel Density</i>	I	10766	18671	32041	46828	27650	27647	35541	33170
	II	20201	30759	6069	19282	17190	17193	30758	33717
	III	12916	34873	8816	34712	5789	32973	6724	42558
<i>Number of Object</i>	I	22	29	1	1	10	10	2	2
	II	11	7	53	9	24	24	7	1
	III	5	1	7	1	17	1	15	1
<i>Number of Edge</i>	I	47	202	1	1	237	235	14	5
	II	20	25	65	67	171	173	26	1
	III	9	1	8	1	17	1	15	21

That is, if a region has more than 20000 white pixels, fewer than 5 objects, and less than 32 edges, that region is perceived as intact region. Otherwise, if a region has less than 20000 white pixels, more than 5 objects, and more than 32 edges, it will be detected as a degraded region.

Table 2 shows the deterioration conditions used to determine blood group in the classification. If the deterioration occurs as a result of serum dropped into the blood, there is a deterioration, otherwise it can be expressed as no deterioration. The tick (✓) sign is distortion, and the cross (X) sign indicates no distortion. For example, the presence of degradation for all three antigens indicates AB+, the absence of degradation for all three antigens indicates that the 0-blood group.

Table 2. Blood group determination criteria

	<i>Anti A</i>	<i>Anti B</i>	<i>Anti D</i>
<i>A+</i>	✓	X	✓
<i>A-</i>	✓	X	X
<i>B+</i>	X	✓	✓
<i>B-</i>	X	✓	X
<i>AB+</i>	✓	✓	✓
<i>AB-</i>	✓	✓	X
<i>0+</i>	X	X	✓
<i>0-</i>	X	X	X

III. RESULTS AND DISCUSSION

Evaluation of the proposed system was performed on the patient data set collected from Karapınar State Hospital Laboratory. The data set was taken using a simple digital camera.

The data set consists of a total of 52 images from previously manually tested blood samples, and the blood type of these images is already known. In this dataset, at least three to five images of each blood group type were taken. After processing 52 images in our database, the results were compared with the results determined by the expert. Accordingly, 44 of 52 images were classified as correct blood group and 84.615% success rate was obtained. Confusion Matrix showing the correct detection rates of application results according to blood groups is given in Table 3.

Table 3. Confusion matrix

	A+	A-	B+	B-	AB+	AB-	0+	0-
A+	6	1	0	0	0	0	0	0
A-	0	5	0	0	0	1	0	0
B+	0	0	4	1	0	0	0	0
B-	0	0	0	6	0	0	0	0
AB+	0	0	0	0	4	1	0	0
AB-	0	0	0	0	0	6	0	0
0+	0	0	0	0	0	0	6	4
0-	0	0	0	0	0	0	0	7

IV. CONCLUSION

In this study, a system that can accurately detect blood group using image processing techniques is proposed. A study was carried out on the patient dataset collected from the Karapınar State Hospital Laboratory. The data set consists of digital images taken through a camera with a resolution of 12 MP. The data set consists of a total of 52 images obtained from previously tested blood samples, and the blood group of these images is already known. In this data set, at least three and at most five images were taken from each type of blood group. These images were processed by image processing methods. First of all, images were converted to gray level and then to binary format. Noisy data were destroyed by morphological processes on the obtained image. After each image was divided into three sections, white pixel density, number of objects and number of edges were determined and these data were analyzed to determine which blood group the image belongs to by the classification technique used. When the results of the application were evaluated, it was observed that the use of 3 different features in blood group determination was an important factor in achieving successful results. While the success rate in the determination of group A blood was high, especially in group B blood determination due to the Rh factor, increased the error. This is because the parameter values of the number of edges and number of objects used in determining the Rh factor are close to each other.

REFERENCES

- [1] A. Yamin, F. Imran, U. Akbar, and S. Hassan Tanvir, "Image Processing Based Detection & Classification of Blood Group Using Color Images", *2017 International Conference of Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE)*, 2017.
- [2] D. T. R. Singh, S. Roy, and O. I. Singh, "A New Local Adaptive Thresholding Technique in Binarization," *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, vol. 8, no. 6, no.2. Nov, 2011.

- [3] A. Dada, D. Beck, G. Schmitz."Automation andData Processing in Blood Banking Using the Ortho AutoVue®Innova System", *Transfusion Medicine Hemotherapy*, vol. 34, pp. 341-346, Sep. 2007.
- [4] B. A. Myhre, D. McRuer., "Human error - a significant cause of transfusion mortality," *Transfusion*, vol. 40, pp. 879-885, July 2000.
- [5] Dr. Derek N., *Handbook of Transfusion Medicine*, 5th ed., TSO, Norwich, United Kingdom, 2013.
- [6] S. Rahman, Md. Atifur Rahman, F. Ashraf Khan, S. Binte Shahjahan and K. Nahar, "Blood Group Detection using Image Processing Techniques," Computer Eng. thesis, Department of Computer Science and Engineering, BRAC University, 24 December 2017.
- [7] G. Ravindran, T. Joby, M. Pravin, and P. Pandiyan, "Determination and Classification of Blood Types using Image Processing Techniques," *International Journal of Computer Applications*, vol. 157, no. 1, pp. 12–16, Jan. 2017.
- [8] R.A. Rathod and R.A. Pathan, "Determination and Classification of Human Blood Types using SIFT transform and SVM Classifier," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol 5, Issue 11, Nov. 2016.
- [9] A. Dhande, P. Bhoir and V. Gade, "Identifying the blood group using Image Processing," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol 05, Issue 03, Mar. 2018.
- [10] A. Ferraz, "Automatic system for determining of blood type using imageprocessing techniques," *Sensors & Actuators*, vol 172, Issue 1, Dec. 2011.
- [11] Akshaya P. Sahastrabudhe, Dr. Sayyad D. Ajjj, "Blood group Detection and RBC, WBC Counting: An Image Processing Approach," *International Journal Of Engineering And Computer Science*, ISSN: 2319-7242, vol. 5, Issue 10, Oct. 2016.

Araştırma Makalesi - Research Article

Sürekli Kalite İyileştirme için Faktöriyel Tasarım Tabanlı Süreç Optimizasyonu

Akın Özdemir^{1*}, Metin Uçurum², Hüseyin Serencam³

Geliş / Received: 28/11/2019

Revize / Revised: 11/08/2020

Kabul / Accepted: 12/08/2020

ÖZ

Deneyin tasarımı, yeni bir süreç geliştirmek veya mevcut bir süreci geliştirmek için kilit bir rol oynar. Literatürde sürekli kalite iyileştirme için faktöriyel deneysel tasarımları kullanılmıştır. Bu makalede, tasarım faktörlerinin optimizasyonu için bir deney verisi analizi yapmak amacıyla faktöriyel deney tasarımına sahip yeni bir yöntem sunulmaktadır. Önerilen yöntem beş ana adıma sahiptir. İlk adım deney öncesi planlama ile ilgilidir. İkinci adım faktöriyel tasarıma sahip deneysel aşamadır. Üçüncü adım bir deneye ait verileri analiz eder. Daha sonra, tasarım faktörlerinin en uygun değerlerini elde etmek için faktöriyel tasarıma dayalı optimizasyon modeli ilk defa geliştirilmiştir. Son adım deneyden elde edilen sonuçları doğrulamak için sonuçlar ve tavsiyeler adımdır. Son olarak, güncel literatürdeki sayısal bir örnek için farklı hedef değerler kullanılarak karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, önerilen faktöriyel tasarıma dayalı süreç optimizasyon modelinin belirtilen hedef değere göre daha fazla varyansı azaltabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Kalite Mühendisliği, Faktöriyel Deney Tasarımı, Belirlenmiş Hedef Değer, Süreç Optimizasyonu*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: akin.ozdemir@omu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1716-6694>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 55139, Türkiye

²İletişim: mucurum@bayburt.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-0725-9344>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, 69000, Türkiye

³İletişim: hserencam@trabzon.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8893-8914>)

Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Trabzon Üniversitesi, Trabzon, 61300, Türkiye

Factorial Design-Based Process Optimization for Continuous Quality Improvement

ABSTRACT

The design of the experiment plays a key role to develop a new process or improve an existing process. In the literature, factorial experimental designs are used for continuous quality improvement. This paper presents a novel methodology with a factorial experimental design in order to conduct an experiment data analysis for the optimization of design factors. The proposed methodology has five main steps. The first step is related to pre-experimental planning. The second step is the experimental phase with a factorial design. The third step analyzes data for an experiment. Next, a factorial design-based optimization model is firstly developed to get the optimal settings of design factors. The last step is the conclusions and recommendations step in order to validate the conclusions from the experiment. Finally, comparison studies are performed using the different target values for a numerical example from the current literature. In addition, it was concluded that the proposed factorial design-based process optimization model could reduce more variance based on the specified target value.

Keywords- Quality Engineering, Factorial Experimental Design, Specified Target Value, Process Optimization

I. INTRODUCTORY REMARKS

Factorial designs are widely used for many processes [1]. A factorial design is one of the experimental design techniques, and it has k design factors and each design factor has two coded levels, which are low coded and high coded levels. This type of factorial experimental design is known as a 2^k factorial design. A comprehensive review of factorial designs was provided by Montgomery [1]. Besides, factorial design-based process optimization is to obtain optimum operating conditions of design factors by using a factorial design.

In the literature, Vining and Myers [2] proposed the dual response model, which is to minimize the estimated process variance when the estimated process mean value is at the target value. They used response surface design for the design phase and the Lagrange multiplier method for the optimization method. Then Del Castillo and Montgomery [3] enhanced the dual response approach with a generalized reduced gradient method while considering response surface designs. Besides, Lin and Tu [4] proposed a mean-squared error (MSE) model while considering the process bias and variance at the same time. They used a standard subroutine in a nonlinear programming technique. Later, Copeland and Nelson [5] improved the MSE model using the desired distance for the process bias, and they demonstrated the Nelder-Mead simplex method.

While considering multiple criteria optimization problems, Ames et al. [6] offered a quadratic loss function-based process optimization model for response surface models to find the optimal setting for design factors. Along the same lines, Borrer [7] introduced an optimization model with a desirability function for the designed experiment. For flexibility, Kim and Lin [8] introduced a fuzzy optimization model to optimize a dual response system when incorporating membership functions. Besides, Kim and Cho [9] developed an integrated design optimization model to incorporate the tolerances on design parameters with tolerance-related costs. Moreover, Kim and Cho [10] introduced a priority-based optimization model using a nonlinear goal programming technique for the response surface approach. While considering unusual weights for the process variance and bias, Tang and Xu [11] proposed another form of the dual response model with the unified formulation. Besides, they used a goal programming approach to optimize the dual response system.

Ding et al. [12] and Shin et al. [13] offered the weighted sum method with the MSE approach in the concept of multi-objective optimization while considering second-order polynomial approximation models. Koksoy [14] and Park et al. [15] studied the weighted MSE models by using fourth-order polynomial functions for the multi-objective optimization problems. In addition, Shaibu and Cho [16] developed an optimization model while considering the desired target value and the process variance using higher-order approximation models. They also developed dual response surface optimization models for each of the three classes of quality characteristics. Next, Costa [17] introduced a model by using each quality interest from the specified target values to minimize the objective function. Costa [17] also reviewed the optimization methods for dual response models using response surface designs. Then Park [18] applied to the bootstrap method to obtain joint confidence regions into the optimum operating conditions. Park [18] also introduced Bonferroni and multivariate normal approximation. Furthermore, Shin et al. [19] proposed an optimization model to obtain the optimal pharmaceutical formulation with the time series target profiles for a pharmaceutical process.

Recent studies in this area were conducted by Chan and Ozdemir [20], Ozdemir and Cho [21, 22], Lu et al. [23], Charterjee et al. [24], Ouyang et al. [25], Ozdemir [26], and Ozdemir and Cho [27] illustrated a wide spectrum of optimization models, including response surface optimization models, interval programming models, dual response approaches for process optimization, and design optimization models for non-standard experimental design regions.

As shown in the current literature, there is no research attempt to develop a factorial design-based process optimization model to obtain optimum levels of design factors. Therefore, there are three main research contributions in this paper. First, the estimated response functions of process mean and variance are obtained by using the least-square method for a factorial design. Second, a factorial design-based process optimization model is firstly proposed to minimize the estimated process variance response function as possible while satisfying the three constraints. Finally, a numerical example from the current literature is given to optimize the design factors using the proposed factorial design-based process optimization model. Besides, comparison studies are performed

using different target values. It is also observed that the selection of the target value could change the optimum levels of design factors while minimizing the estimated process variance.

The rest of this paper is organized as follows: First, the proposed methodology is presented in Section II with five steps. Then a numerical example is conducted in Section III. Comparison studies are also performed. Next, the discussion section is presented in Section IV. Finally, conclusions and further studies are drawn in Section V.

II. PROPOSED METHODOLOGY

The proposed methodology includes five steps, namely the pre-experimental planning step, the experimental step, the data analysis step, the optimization step, and the conclusions and recommendations step. Each of the steps is described in what follows.

A. The Pre-Experimental Planning Step

The first step of the proposed methodology is pre-experimental planning, and this step is related to how to increase the process of knowledge. Indeed, the process of knowledge is the key design factors that require further detailed analyses. The experimenter or researcher should choose design factors at two levels based on the experiences or prior knowledge about the product or process. Besides, design factors influence the product or process performance measure. This performance measure is a response variable. It is also noted that the response variable should be selected depending on key design factors for the process in this step.

B. The Experimental Step

A factorial design is chosen to experiment with process optimization in the experimental step. Besides, a number of experimental runs and the selection of a model order are important to the selection of experimental design. For the factorial design, the number of experimental runs is fewer and the first-order model with interaction terms is used. Therefore, the factorial design is a good choice for the experimenter or researcher. Notice that the factorial design is denoted geometrically as a cube or a square.

C. The Data Analysis Step

The least-square method is used to analyze data from a factorial design in this paper. For this particular purpose, the estimated process mean function is found in the following way:

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}) = \hat{\alpha}_0 + \mathbf{x}^T \mathbf{a} + \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} \text{ where } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_2 \\ \vdots \\ \hat{\alpha}_n \end{bmatrix}, \text{ and } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \hat{\alpha}_{11} & \hat{\alpha}_{12}/2 & \dots & \hat{\alpha}_{1n}/2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\alpha}_{n1}/2 & \hat{\alpha}_{n2}/2 & \dots & \hat{\alpha}_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

where $\hat{\alpha}_{11} = \hat{\alpha}_{22} = \dots = \hat{\alpha}_{nn} = 0$ due to the first-order and interaction terms, and α_i is the regression coefficient in the least-square method. \mathbf{x} denotes the vector of the design factors of the experiment. In Equation (1), \mathbf{a} and \mathbf{A} represent the estimated regression coefficients.

The estimated process variance function is expressed as follows:

$$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}) = \hat{\beta}_0 + \mathbf{x}^T \mathbf{b} + \mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} \text{ where } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_n \end{bmatrix}, \text{ and } \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1n}/2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\beta}_{n1}/2 & \hat{\beta}_{n2}/2 & \dots & \hat{\beta}_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

where $\hat{\beta}_{11} = \hat{\beta}_{22} = \dots = \hat{\beta}_{mm} = 0$ due to the first-order and interaction terms, and $\hat{\beta}_i$ is the regression coefficient. In Equation (2), \mathbf{b} and \mathbf{B} represent the estimated regression coefficients.

D. The Optimization Step

The variance reduction is an important issue in quality engineering problems. Therefore, the objective function minimizes the estimated process variance function as follows:

$$\text{Minimize } \hat{\sigma}^2(\mathbf{x}) \quad (3)$$

The proposed process optimization model has three constraints.

1. The process target related constraint: The estimated process mean is desired at the specified target value. This constraint is important to meet the customer's satisfaction. This constraint is denoted as follows:

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}) = \mu_\tau \quad (4)$$

where μ_τ represents the specified target value by the customer.

2. Prevention of non-meaningful results: The estimated variance should not be a negative value. Thus, the constraint is

$$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}) \geq 0 \quad (5)$$

3. Bounds for each design factor: A factorial experimental design consists of -1 and +1 coded levels for each design factor. Thus, an optimal solution to design factors could be found between -1 and +1 coded levels. Notice that a design region is either a square or n -cube. The bounds are

$$-1 \leq x_i \leq +1 \text{ and } i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Table 1 shows the factorial design-based proposed process optimization model.

Table 1. The proposed factorial design-based process optimization model

Minimize	$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}) \Rightarrow \hat{\beta}_0 + \mathbf{x}^T \mathbf{b} + \mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x}$
Subject to	
I	$\hat{\mu}(\mathbf{x}) = \mu_\tau \Rightarrow \hat{\alpha}_0 + \mathbf{x}^T \mathbf{a} + \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} = \mu_\tau$
II	$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}) \geq 0 \Rightarrow \hat{\beta}_0 + \mathbf{x}^T \mathbf{b} + \mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} \geq 0$
III	$-1 \leq x_i \leq +1 \text{ and } i = 1, 2, \dots, n$

E. The Conclusions and Recommendations Step

Once steps one to four have been completed, the experimenter or researcher could conclude from the results of the factorial experimental design and give some recommendations about the process. The verification study is recommended for different target values in order to validate the results of the factorial design.

III. NUMERICAL EXAMPLE

A numerical example was used in this paper from Myers et al. [28]. Engineers at a semiconductor manufacturer conducted a 2^4 factorial design in a vertical oxidation furnace [28]. The aim of the experiment was to analyze the effects of the four design factors in oxide thickness [28]. The four design factors are specified as temperature (x_1), time (x_2), pressure (x_3), and gas flow (x_4). The experiment measured the oxide thickness on all

four wafers. Table 2 shows the data for the experiment. The design region is an n -cube because of the 2^4 factorial experimental design. In Table 2, the four columns (y_1 , y_2 , y_3 , and y_4) are the oxide thickness measurements on each wafer, and the last two columns (\bar{y} and s^2) are the sample mean and sample variance of thickness measurements on the four wafers in each experimental run. Besides, the Maple [29] software was used for the data analysis and optimization steps.

Table 2. The factorial experimental design for the oxide thickness experiment (please see Myers et al. [28])

Standard Order	Randomization Order	x_1 (Temperature)	x_2 (Time)	x_3 (Pressure)	x_4 (Gas Flow)	y_1	y_2	y_3	y_4	\bar{y}	s^2
1	10	-1	-1	-1	-1	378	376	379	379	378	2.00
2	7	+1	-1	-1	-1	415	416	416	417	416	0.67
3	3	-1	+1	-1	-1	380	379	382	383	381	3.33
4	9	+1	+1	-1	-1	450	446	449	447	448	3.33
5	6	-1	-1	+1	-1	375	371	373	369	372	6.67
6	2	+1	-1	+1	-1	391	390	388	391	390	2.00
7	5	-1	+1	+1	-1	384	385	386	385	385	0.67
8	4	+1	+1	+1	-1	426	433	430	431	430	8.67
9	12	-1	-1	-1	+1	381	381	375	383	380	12.00
10	16	+1	-1	-1	+1	416	420	412	412	415	14.67
11	8	-1	+1	-1	+1	375	372	371	370	371	0.67
12	1	+1	+1	-1	+1	445	448	443	448	446	6.00
13	14	-1	-1	+1	+1	377	377	379	379	378	1.33
14	15	+1	-1	+1	+1	391	391	386	400	392	34.00
15	11	-1	+1	+1	+1	375	376	376	377	376	0.67
16	13	+1	+1	+1	+1	430	430	428	428	429	1.33

The estimated mean response function was found using Equation (1) as follows:

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}) = 399.19 + 21.56x_1 + 9.06x_2 - 5.19x_3 - 0.81x_4 + 8.44x_1x_2 - 5.31x_1x_3 + 0.56x_1x_4 + 1.94x_2x_3 - 1.94x_2x_4 + 0.56x_3x_4 \quad (7)$$

The estimated variance response function was found using Equation (2) as follows:

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}) = 6.13 + 2.71x_1 - 3.04x_2 + 0.79x_3 + 2.71x_4 - 0.96x_1x_2 + 1.87x_1x_3 + 2.46x_1x_4 - 1.04x_2x_3 - 3.62x_2x_4 - 0.29x_3x_4 \quad (8)$$

The specified target value is 400 for the oxide thickness experiment. Table 3 shows the proposed factorial design-based process optimization model with Equations (7-8). The Maple [29] sequential quadratic programming solver was used to obtain the results of design factors in Tables 4-6. The sequential quadratic programming was used because of the interaction terms in Equations (7-8).

Table 3. The proposed factorial design-based process optimization model for the oxide thickness experiment

Minimize	$6.13 + 2.71x_1 - 3.04x_2 + 0.79x_3 + 2.71x_4 - 0.96x_1x_2 + 1.87x_1x_3 + 2.46x_1x_4 - 1.04x_2x_3 - 3.62x_2x_4 - 0.29x_3x_4$
Subject to	
Constraint I	$399.19 + 21.56x_1 + 9.06x_2 - 5.19x_3 - 0.81x_4 + 8.44x_1x_2 - 5.31x_1x_3 + 0.56x_1x_4 + 1.94x_2x_3 - 1.94x_2x_4 + 0.56x_3x_4 = 400$
Constraint II	$6.13 + 2.71x_1 - 3.04x_2 + 0.79x_3 + 2.71x_4 - 0.96x_1x_2 + 1.87x_1x_3 + 2.46x_1x_4 - 1.04x_2x_3 - 3.62x_2x_4 - 0.29x_3x_4 \geq 0$
Constraint III	$-1 \leq x_i \leq +1$ and $i = 1, 2, 3, 4$

The results of design factors are shown in Table 4 for the factorial experimental design where the specified target value is 400.

Table 4. Results of design factors where $\mu_t = 400$

Design factor	Optimal coded level
x_1 (Temperature)	-0.111
x_2 (Time)	1.000
x_3 (Pressure)	1.000
x_4 (Gas Flow)	1.000

The estimated variance response function is obtained at 0.963 for the oxide thickness experiment. Tables 5 and 6 show the results of design factors while specifying different target values. For example, the process variance is 1.082E-15 (almost zero) where the specified target value is 375. On the other hand, the process variance is 1.208 where the specified target value is 445. Thus, the choice of the specified target value is important to reduce the process variance and meet the customer's expectation.

Table 5. Results of design factors where $\mu_t < 400$

Design factor	Optimal coded level	Optimal coded level	Optimal coded level	Optimal coded level	Optimal coded level
	for $\mu_t = 375$	for $\mu_t = 380$	for $\mu_t = 385$	for $\mu_t = 390$	for $\mu_t = 395$
x_1 (Temperature)	-0.945	-0.864	-0.662	-0.477	-0.306
x_2 (Time)	0.975	0.508	0.702	0.840	0.977
x_3 (Pressure)	-0.725	0.860	0.806	0.918	0.997
x_4 (Gas Flow)	1.000	1.000	0.999	0.999	0.975
Objective function value	1.082E-15	4.317E-11	1.291E-13	9.992E-16	1.544E-12

Table 6. Results of design factors where $\mu_t > 400$

Design factor	Optimal coded level	Optimal coded level	Optimal coded level	Optimal coded level	Optimal coded level
	for $\mu_t = 405$	for $\mu_t = 415$	for $\mu_t = 425$	for $\mu_t = 435$	for $\mu_t = 445$
x_1 (Temperature)	0.023	0.178	1.000	1.000	1.000
x_2 (Time)	1.000	1.000	-0.403	0.168	0.739
x_3 (Pressure)	0.426	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
x_4 (Gas Flow)	1.000	0.871	-1.000	-1.000	-1.000
Objective function value	2.064	3.161	0.454	0.831	1.208

Notice that no feasible solution could be found for the proposed factorial design-based process optimization model where the specified target value is, for example, 500 or 370. This situation is a limitation of the proposed process optimization model. The achievement of the proposed process optimization model is based on the specified target value.

IV. DISCUSSIONS

R^2 (coefficient of determination) is 99.68% for the estimated mean response function. Besides, the estimated mean response function is well-estimated based on the R^2 value. Each level of the temperature factor affects ± 21.56 for the oxide thickness. This factor is important to satisfy the process target related constraint. The optimum levels of the temperature factor varied based on the specified target value. Then each level of the time factor affects ± 9.06 for the oxide thickness. This design factor is important as well. In general, the optimum levels

of the time factor were obtained at high levels. Next, pressure is an important factor to satisfy the process target related constraint. Each level of the pressure factor affects ∓ 5.19 for the oxide thickness. The optimum levels of the pressure design factors were usually obtained at high levels when $\mu_r < 400$. On the other hand, the optimum levels of the pressure design factor were usually obtained at low levels when $\mu_r > 400$. Besides, the gas flow design factor is not more important than other design factors. It is also noted that the interaction term of the temperature and time design factors is important. Each level of this interaction term also affects ± 8.44 for the oxide thickness. The optimum levels of the gas flow design factors were always obtained at high levels when $\mu_r < 400$. On the other hand, the optimum levels of the gas flow design factor were often obtained at low levels when $\mu_r > 400$. Besides, the interaction term of the temperature and pressure design factors is important. Each level of this interaction term also affects ∓ 5.31 for the experiment. Next, the interaction term of the time and pressure design factors, and the interaction term of the time and gas flow design factors are important, and each level of these interaction terms affects ± 1.94 for the experiment. Other interaction terms are not significant for the oxide thickness.

R^2 is 71.36% for the estimated variance response function, and this value shows a good performance to estimate the process variance. Based on the main effects of the estimated variance response, the temperature, time, and gas flow design factors are significant to reduce the estimated process variance in the objective function. Besides, the interaction term of the temperature and pressure design factors, the interaction term of the temperature, and gas flow design factors, and the interaction term of the time and gas flow are significant to reduce the estimated process variance of the oxide thickness. It is also noticed that the process target related constraint affects the objective function of the proposed optimization model. The smallest estimated process variance value was obtained when $\mu_r = 390$.

V. CONCLUDING REMARKS AND FURTHER STUDIES

Factorial designs are highly effective to analyze design factors for many process. For this particular purpose, a five-phased methodology is proposed in this paper for continuous quality improvement. For the experimental step, a two-level factorial experimental design is selected while considering the first-order and interaction terms. The process mean and variance functions are obtained with the experimental data from the two-level factorial experimental design. Then a factorial design-based process optimization model is developed to obtain the optimal settings of design factors. In this paper, a numerical example is used from the current literature (please see Myers et al. [28]). The process variance was obtained as $1.082E-15$ (almost zero) where the specified target value was 375. On the contrary, the process variance was found as 1.208 where the specified target value was 445. Therefore, the results of this example show that the proposed methodology is useful to reduce the process variance for the experiment. Note that the specified target value is an important parameter to find a feasible solution setting for the proposed process optimization model.

There are three main limitations of this study. First of all, this paper just focused on the main and interaction effects of the regression model because two coded levels-based factorial designs analyze the main and interaction effects. For example, quadratic effects are not analyzed by using two coded levels-based factorial designs. Second, the proposed methodology works well for a response variable. For more than one variable, the proposed methodology is not effective to obtain optimum conditions. Finally, the results of design factors are based on the specified target value.

For further studies, an extension of this paper could be to build a second-order model to analyze the data. For this particular purpose, a response surface design could be used for the proposed methodology. Another extension could be to focus on more than one response variable for some process optimization problems. In addition, the MSE model could be used in the optimization step in order to eliminate a limitation of the proposed process optimization model in this paper.

REFERENCES

- [1] Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to Statistical Quality Control*. New York: John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- [2] Vining, G. G., & Myers, R. H. (1990). Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach. *Journal of Quality Technology*, 22(1), 38-45.
- [3] Del Castillo, E., & Montgomery, D. C. (1993). A nonlinear programming solution to the dual response problem. *Journal of Quality Technology*, 25(3), 199-204.
- [4] Lin, D. K., & Tu, W. (1995). Dual response surface optimization. *Journal of Quality Technology*, 27(1), 34-39.
- [5] Copeland, K. A., & Nelson, P. R. (1996). Dual response optimization via direct function minimization. *Journal of Quality Technology*, 28(3), 331-336.
- [6] Ames, A. E., Mattucci, N., Macdonald, S., Szonyi, G., & Hawkins, D. M. (1997). Quality loss functions for optimization across multiple response surfaces. *Journal of Quality Technology*, 29(3), 339-346.
- [7] Borrór, C. M. (1998). Mean and variance modeling with qualitative responses: A case study. *Quality Engineering*, 11(1), 141-148.
- [8] Kim, K. J., & Lin, D. K. (1998). Dual response surface optimization: a fuzzy modeling approach. *Journal of Quality Technology*, 30(1), 1-10.
- [9] Kim, Y. J., & Cho, B. R. (2000). Economic integration of design optimization. *Quality Engineering*, 12(4), 561-567.
- [10] Kim, Y. J., & Cho, B. R. (2002). Development of priority-based robust design. *Quality Engineering*, 14(3), 355-363.
- [11] Tang, L. C., & Xu, K. (2002). A unified approach for dual response surface optimization. *Journal of Quality Technology*, 34(4), 437-447.
- [12] Ding, R., Lin, D. K., & Wei, D. (2004). Dual-response surface optimization: a weighted MSE approach. *Quality Engineering*, 16(3), 377-385.
- [13] Shin, S., Samanlioglu, F., Cho, B. R., & Wiecek, M. M. (2011). Computing trade-offs in robust design: perspectives of the mean squared error. *Computers & Industrial Engineering*, 60(2), 248-255.
- [14] Köksoy, O. (2006). Multiresponse robust design: Mean square error (MSE) criterion. *Applied Mathematics and Computation*, 175(2), 1716-1729.
- [15] Park, H., Park, S. H., Kong, H. B., & Lee, I. (2012). Weighted sum MSE minimization under per-BS power constraint for network MIMO systems. *IEEE Communications Letters*, 16(3), 360-363.
- [16] Shaibu, A. B., & Cho, B. R. (2009). Another view of dual response surface modeling and optimization in robust parameter design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(7-8), 631-641.
- [17] Costa, N. R. P. (2010). Simultaneous optimization of mean and standard deviation. *Quality Engineering*, 22(3), 140-149.
- [18] Park, C. (2013). Determination of the joint confidence region of the optimal operating conditions in robust design by the bootstrap technique. *International Journal of Production Research*, 51(15), 4695-4703.

- [19] Shin, S., Truong, N. K. V., Goethals, P. L., Cho, B. R., & Jeong, S. H. (2014). Robust design modeling and optimization of a multi-response time series for a pharmaceutical process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(5-8), 1017-1031.
- [20] Chan, H. L., & Ozdemir, A. (2017). The development of a customer-centred, response surface methodology-based robust parameter design optimisation model under a moderately skewed production process. *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation*, 5(4), 255-284.
- [21] Ozdemir, A., & Cho, B. R. (2016). A nonlinear integer programming approach to solving the robust parameter design optimization problem. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(8), 2859-2870.
- [22] Ozdemir, A., & Cho, B. R. (2017). Response surface-based robust parameter design optimization with both qualitative and quantitative variables. *Engineering Optimization*, 49(10), 1796-1812.
- [23] Lu, Y., Wang, S., Yan, C., & Huang, Z. (2017). Robust optimal design of renewable energy system in nearly/net zero energy buildings under uncertainties. *Applied Energy*, 187, 62-71.
- [24] Chatterjee, K., Drosou, K., Georgiou, S. D., & Koukouvinos, C. (2018). Response modelling approach to robust parameter design methodology using supersaturated designs. *Journal of Quality Technology*, 50(1), 66-75.
- [25] Ouyang, L., Ma, Y., Wang, J., Tu, Y., & Byun, J. H. (2018). An interval programming model for continuous improvement in micro-manufacturing. *Engineering Optimization*, 50(3), 400-414.
- [26] Özdemir, A. (2019). A mixed integer linear programming model for finding optimum operating conditions of experimental design variables using computer-aided optimal experimental designs. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 551-559.
- [27] Ozdemir, A., & Cho, B. R. (2019). Response surface optimization for a nonlinearly constrained irregular experimental design space. *Engineering Optimization*, 51(12), 2030-2048.
- [28] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA.
- [29] Maple, V., 2013. Waterloo maple software. University of Waterloo Version, 17.

Araştırma Makalesi - Research Article

Vermikompost ile Birlikte Verilen Potasyum ve Fosforun Adsorbsiyonu Üzerine Bir Araştırma¹

Nuri Burak Aslantekin², Nuray Mücellâ Müftüoğlu^{3*}

Geliş / Received: 07/03/2020

Revize / Revised: 30/07/2020

Kabul / Accepted: 05/08/2020

ÖZ

Yurtdışında ve ülkemizde yapılan bazı çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, vermikompostun bitki verimi üzerinde etkili olduğu saptanmıştır. Ancak vermikompost kullanımından dolayı fosfor (P) ve potasyum (K) elementlerinin tutunmaları konusunda çalışma bulunmamaktadır. Denemede, organik bir madde olan vermikompostun P ve K elementlerini tutması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneme, iki bağımsız deneme şeklinde kurulmuş olup, P ve K elementlerinin tutunabilirliği takip edilmiştir. Denemede; vermikompost aynı dozda (1000 kg/da), P elementi (0, 4, 8, 12, 16 ve 20 kg P₂O₅/da) ve K elementi (0, 10, 20, 30, 40 ve 50 kg K₂O/da) dozlarında kullanılmış ve 15 gün ara ile 6 yıkamaya tabi tutulmuştur. Perlit ortamına katılan vermikompost ile artan P₂O₅ ve K₂O uygulamaları incelendiğinde yıkanan P₂O₅ ve K₂O miktarının 6 yıkama sonucunda düzenli olarak ortama katılan miktarları arttıkça yıkanan miktarının da arttığı saptanmıştır. Fosforda en fazla yıkanma 4 kgP₂O₅/da düzeyinde (%45.2), en düşük yıkanma ise 12 kgP₂O₅/da düzeyinde (%32.2) bulunmuştur. Potasyumda ise en fazla yıkanma 50 kgK₂O/da düzeyinde (%66.8), en az yıkanma ise 10 kgK₂O/da düzeyinde (%43.9) tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Adsorbsiyon, Fosfor, Potasyum, Vermikompost

¹Bu çalışma Nuri Burak Aslantekin tarafından, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalında yapılan Yüksek Lisans Tezinin bir kısmını kapsamakta olup Ankara'da 12-15 Temmuz 2018 tarihleri arasında yapılan Uluslararası Avrasya Doğal Beslenme ve Sağlıklı Yaşam Zirvesi'nde sunulmuş, özet bildirisi olarak yer almıştır.

²İletişim: burak-546@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0156-9130>)

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Terzioğlu Yerleşkesi, 17100 Çanakkale

^{3*}Sorumlu yazar iletişimi: mucella@comu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6065-029X>)

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Terzioğlu Yerleşkesi, 17100 Çanakkale

A Study on the Adsorption of Potassium and Phosphorus Given Together with Vermicompost

ABSTRACT

Considering some studies conducted previously in Turkey and abroad, vermicompost was found to be effective on plant yield. However, due to the use of vermicompost, there are no studies on the adsorption of phosphorus (P) and potassium (K) elements. In the experiment, the effects of vermicompost, an organic fertilizer, on the retention of P and K elements were investigated. The experiment was established as 2 independent trials and the adsorption of P and K was followed. In experiments, vermicompost in the same dose (10000 kg ha⁻¹), the dosages of P element (0, 40, 80, 120, 160 and 200 kg P₂O₅ ha⁻¹), K element (0, 100, 200, 300, 400 and 500 kg K₂O ha⁻¹) and 6 washings with 15 days interval was applied. When increased phosphorus and potassium applications were examined with vermicompost added to perlite medium, it was found that the amount of P₂O₅ and K₂O washed increased as the amount added regularly to the medium increased as a result of 6 washings. The highest washing at P₂O₅ was found at 40 kg ha⁻¹ (45.2%) and the lowest washing at 120 kg ha⁻¹ (32.2%). In potassium, the highest washing was found at 500 kg K₂O ha⁻¹ (66.8%) and the least washing was found at 100 kg K₂O ha⁻¹ (43.9%).

Keywords- *Adsorption, Phosphorus, Potassium, Vermicompost*

I. GİRİŞ

Dünya nüfus artış hızı ilk çağlarda yavaş olmasına rağmen son birkaç yüzyılda bu hızın oransal olarak arttığı görülmektedir. İnsanlar başlangıçta balıkçılıkla, toplayıcılıkla, avcılıkla geçindiklerinden küçük insan grupları için geniş alanlara gereksinim duyuluyordu. Daha sonra yerleşik yaşama geçilmesiyle tarımla uğraşılması, hayvanların evcilleştirilmesi nedeniyle daha küçük alanlar yeterli olmuştur. Ancak günümüzde tarım ve tıp alanındaki ilerlemeler, sanayi devriminin etkileri ile dünya nüfusunda hızlı artışlar görülmektedir. Nüfusun hızla artışı tarımda küçük alanlardan fazla ürün alınma gereğini doğurmuş, bu ise kimyasal gübrelerin devreye girmesine neden olmuştur. Kimyasal gübrelerin aşırı düzeyde ve bilinçsizce kullanımı yeraltı ve yer üstü tatlı su kaynaklarının kirlenmesine neden olmuştur. Kirlenmenin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak amacıyla son yıllarda; konvansiyonel tarımın yetiştiricilikteki payını azaltmak için iyi tarım, organik tarım gibi sistemler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Ülkemizde kullanımı yaygın olmasa da solucanlar tarafından üretilen organik bir madde olan vermikompost dünya çapında birçok ülke tarafından kullanılmakta olup en önemli etkisi toprak biyolojik özellikleri üzerine olmakta, içerisinde yer alan yararlı mikroorganizmalar bitkinin kök bölgesine yerleşerek çeşitli antibiyotik, enzim ve bitki gelişim düzenleyicileri salgulamakta, böylece bitkinin toprak kökenli hastalığa neden olan organizmalardan korunmasını, toprakta yayılsız konumdaki organik bağlı besin elementlerinden faydalanmasını, bitkinin kök, sürgün gelişimi ve meyve tutumuna yardımcı olmaktadır [23]. Kompostlamada solucan kullanmanın faydası, sadece bitkisel üretimi artırması değil aynı zamanda ortamda hastalık etmeni olan organizmaları da azaltması, bitkisel üretimde toprakların sürdürülebilir olmasına yönelik pek çok eksikliğini ortadan kaldırması, toprağa sağladığı biyolojik, fiziksel ve kimyasal iyileşmeler sebebiyle son zamanlarda en çok tutulan organik maddelerden biri olmasıdır [22]. Vermikompost çeşitli özellikteki organik atıkların bazı toprak solucanları tarafından bünyelerinde sindirmeleri sırasında kompostlaştırılan, bitki besin maddeleri, mikroorganizmalar, çeşitli enzimler, organik madde, humik ve fulvik asitlerce zengin özelliklere sahip hem toprak düzenleyicisi olarak hem de aynı zamanda bitki beslemede açısından gübre olarak kullanılan organik bir madde olarak tanımlanmaktadır [8]. Organik atıklardan yararlanılması amacı ile elde edilen vermikompost, ekonomik ve sürdürülebilir bir yöntem olarak bitki büyümesini olumlu yönde artırmakta, bitki beslemede yardımcı olmakta, küçük veya orta ölçekli tarım işletmeleri için ek bir masrafa gerek kalmaksızın az miktardaki girdiler ile üretim sistemini olanaklı hale getirmektedir. Ayrıca organik tarıma geçiş sürecindeki ilk yıllarda görülen ürün düşüşünü de telafi edebilmektedir [21]. Vermikompost uygulamasının ıspanak bitkisinin verim, verim özellikleri, toprak verimlilik özellikleri üzerine kontrole oranla önemli artışlar gösterdiği, özellikle bitkinin demir (Fe) ve toprağın kalsiyum (Ca) miktarı üzerine 200 kg/da vermikompost uygulamasının en iyi sonucu verdiği, toprak reaksiyonu (pH), suda çözünebilir tuz (EC) ve organik madde değerlerinin tüm uygulamalarda kontrole göre artışlar gösterdiği belirlenmiştir [19]. Kompostun tarımda kullanılma uygulamaları ülkemiz için yeni sayılabilecek niteliktedir. Organik atıkların normal olgunlaştırma yöntemleri ile kompost şekline getirilmesinin yanında, toprak solucanlarının ilave edilmesi ile vermikompost elde edilerek değerlendirilmesi de mümkündür [4]. Fosfor adsorpsiyonu ve fiksasyonu üzerine yapılan çalışmada toprak örneğine P32 uygulanarak topraklarda kil, değişebilir Ca, magnezyum (Mg) miktarının fosfor adsorpsiyonu ve fiksasyonu üzerinde pozitif etkileri olduğu ancak kum miktarı ve ortamda var olan fosforun olumsuz etkileri olduğu sonucuna ulaşılmıştır [6]. Bitki ihtiyaç duyduğu fosforun önemli bir bölümünü toprak çözeltisinden ve az bir kısmını da doğrudan toprağın katı kısmından almakta, toprak solüsyonunda azalan fosfor yerine katı fazdan sağlanan fosforla denge kurulmakta, denge toprak çözeltisi aleyhine bozulduğu anda bitkilerin fosfor gereksinimlerini karşılayamadıkları belirtilmiştir [9]. Özellikle kurak ve yarı kurak iklim özelliklerine sahip alanlardaki yer alan topraklarda fosfor adsorpsiyonu ile toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri arasındaki etkileşimin çok yönlü olmasının adsorpsiyonun açıklanmasını zorlaştırdığı, ancak toprakların kireç içeriği, kil tipi ve Fe oksit miktarlarının fosfor adsorpsiyonu üzerinde etkili faktörler olduğu belirtilmiştir [12]. Artan seviyelerde sıvı TKİ-Hümas ve fosfor uygulamalarının fasulye bitkisinin verim ve kalite unsurları üzerine etkileri belirlemek amacıyla tarla şartların yürütülen bir çalışmada TKİ-Hümas 0, 4, 8, 12 L/da ve diamonyum fosfat gübresi kaynaklı fosfor 0, 5.0, 7.5 ve 10 kg P₂O₅/da kullanılmış, araştırma sonuçlarına göre fasulye bitkisinin verimi üzerine hem TKİ-Hümas hem de fosfor uygulamalarının etkisi istatistiki bakımdan önemli bulunmuş, bitkilerin beslenmesi, ekonomik olması ve verimin artırılması bakımından 12 L/da TKİ-Hümas ve 5 kg P₂O₅/da kombinasyonu önerilebileceği belirtilmiştir [13]. Ortamda organik maddenin bulunmasının P adsorpsiyonunu artıran bir etmen olduğu dolayısı ile organik maddenin fosfor adsorbe etme kabiliyetinin bulunduğunu gösterdiği belirtilmektedir [24].

Toprağa gübre olarak ilave edilen veya toprakta değişik şekillerde bulunmakta olan potasyumun, toprak ve çevre koşullarına göre elverişli şekle veya fikse olarak elverişsiz şekle dönüştüğü, potasyum fiksasyonunun diğer bazı katyonik besin elementlerinin toprakta tutulmasından farklı bir şekilde açıklanmaya gereksinim olduğu, fikse olan potasyumla katyon değişim kapasitesinin, değişebilen ve güçlükle değişebilen potasyum miktarları arasında istatistiksel olarak önemli pozitif ilişkiler olduğu belirtilmiştir [18]. Bitki besin elementleri içerisinde önemli bir etkiye sahip olan potasyumun pH ile ilişkisinin tam olarak aydınlatılmış sayılamayacağını ancak potasyumun asit ortamlarda Fe, alüminyum (Al) ve H iyonları ile rekabeti sonucunda fiksasyonunun azaldığını, bunun aksine alkalın topraklarda ise daha fazla fiksasyona uğradığı belirtilmektedir [5]. Potasyumun en önemli kaynaklarını denizsel evaporitler oluşturur ve üretiminin %90'ı gübre sanayinde kullanılmaktadır. Magmatik, sedimanter ve metamorfik kökenli pek çok kayaç içindeki silikatlı minerallerin yapısında değişen oranlarda yer almaktadır. Bu değişiklik, ana maddenin yaşı, mineral çeşidi ve iklim koşullarından kaynaklanmaktadır. Kumtaşı ya da kuvarzit üzerinde oluşmuş kaba bünyeli toprakların K içeriği, potasyumlu mineral içeren kayalar üzerinde oluşan ince bünyeli toprakların K içeriğinden oldukça düşüktür. Ayrıca bol miktarda yağış alan bölgelerde yıkanmanın K olması nedeniyle toprağın K içeriği düşmektedir [10]. Potasyum litosferin yaklaşık %2.5'ini oluşturmaktadır. Potasyum bitkinin ihtiyaç duyduğu elementler arasında azottan sonra en fazla alınan besin elementidir. Potasyum içerikleri topraklarda büyük değişkenlik (%0.04-3.00) göstermektedir [3]. Toprakların toplam K içeriği, çoğunlukla bitkilerin bir gelişme mevsimi boyunca absorbe ettiği miktarın birçok katı olduğu halde, çoğu durumda, bu toplam potasyumun ancak çok küçük bir bölümü bitkilere yararlıdır. Bitki gelişimi için zorunlu olan potasyum elementinin, bitkilerdeki konsantrasyonu tipik olarak kuru maddenin %0.5-6.0'sı arasında değişmekle birlikte, bazı durumlarda daha yüksek oranlarda da bulunabilir. Bitki hücrelerinde en fazla bulunan katyondur ve bitki kuru ağırlığının %10'unu içerecek şekilde bulunabilir [20].

Yapılan bu çalışma ile organik bir madde olan ve kullanımı gittikçe artan vermikompostun ilave edildiği ortamlarda bitki için çok önemli olan P ve K elementlerinin tutunmalarını nasıl etkilendiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Farklı gübre uygulamalarının vermikompost üzerine farklı dozlarda uygulamasıyla yürütülen çalışmada, farklı gübre kaynaklarının vermikompost tutulma parametreleri üzerinde etkinliğinin ortaya konulması amacıyla yürütülmüştür.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Denemede ortam olarak nötr reaksiyonlu süper iri tarım perlit, organik madde olarak vermikompost, fosfor kaynağı olarak triplesüper fosfat (TSP, %42 P₂O₅) gübresi, potasyum kaynağı olarak potasyum sülfat (PS, %51 K₂SO₄) gübresi, yıkama işlemlerinde saf su kullanılmıştır.

Denemede kullanılan vermikompostun reaksiyonu 6.60, suda çözünebilir tuz değeri 2.60 dS/m, suda çözünebilir potasyum 6683.93 mg/kg, toplam potasyum 10137.39 mg/kg, suda çözünebilir fosfor 193.62 mg/kg, toplam fosfor ise 3896.96 mg/kg değerindedir.

Deneme, yarı kontrollü serada, 6 farklı doz, 4 tekrerrük olmak üzere fosfor ve potasyum için iki ayrı deneme şeklinde toplam 48 saksı ile tesadüf parseli faktöriyel deneme desenine göre kurulmuştur. Saksılara hacim esasına göre 3.5 L perlit doldurulmuş ve hepsine 1000 kg/da hesabı ile vermikompost ilave edilip üst kısmı homojen bir şekilde karıştırılarak saksı içeriği saf su ile doyurulmuştur.

Marul bitkisinde vermikompost uygulamasının yaygın olması nedeni ile bu bitkinin besin maddesi istekleri dikkate alınmıştır. Marul bitkisinin yetiştirilmesi için 10-12 kg P₂O₅ ve 18-20 kg K₂O verilmesinin yeterli olduğu belirtilmiştir [7]. Bu nedenle perlit ve vermikompost bulunan saksılara fosfor uygulaması için TSP gübresi 0, 4, 8, 12, 16, 20 kg P₂O₅/da, potasyum uygulaması için K₂SO₄ gübresi 0, 10, 20, 30, 40, 50 kg K₂O/da olacak şekilde saf suda çözülerek uygulanmıştır.

Potasyum ve fosforun saksılar içerisinde vermikomposta tutunmaları için iki hafta beklendikten sonra yıkama başlamış ve iki hafta aralıklarla yapılan 1., 2., 3. yıkamalarda 300 mL saf su ve 4., 5., 6. yıkamalarda 250 mL saf su ile yavaş yavaş doyularak saksı altlıklarında biriken örneklerin taşmasına izin verilmeksizin alınmış, mezür ile ölçülmüş, balon jöjelere ve pet şişelere aktarılmıştır. İki hafta aralıklarda alınan örnekler aynı gün içerisinde laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvara getirilen örnekler filtre kâğıdından süzülerek homojen hale

getirilip balon jöjelere aktarılıp analizlerin yapılacağı zamana kadar buzdolabında saklanmıştır. Fosfor analizi, denemeden alınan süzükler bulunan fosfor miktarına göre oluşan mavi renk yoğunluğunun spektrometrede standart çözeltilerle karşılaştırılması esasına göre, potasyum analizi, denemeden alınan süzüklerdeki potasyum miktarlarının alev fotometresi ile belirlenmesi esasına göre tespit edilmiştir [14].

Deneme sonucunda elde edilen veriler MINITAB 18.0 istatistik paket programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Veriler tesadüf parselleri deneme desenine göre varyans analizine tabi tutularak F testi ile önemlilik kontrolleri yapılmış, özelliklere ait ortalama değerlerin çoklu karşılaştırılması ise LSD çoklu karşılaştırma testi ile yapılmıştır.

III. BULGULAR

A. Fosfor yıkama bulguları

Perlit ortamına ilave edilen vermikompost ve artan dozdaki fosfor uygulamalarının yıkanan fosfor miktarlarına olan etkisi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ortamdan Yıkanan Fosfor Miktarları

VK (kg/da)	P ₂ O ₅ (kg/da)	Yıkanan P ₂ O ₅ Miktarı (g/da)						Toplam	%
		1.	2.	3.	4.	5.	6.		
0		32 C	331 B	74 D	36 C	37 D	25 D	535 E	-
4		205 C	687 A	360 CD	263 BC	287 C	206 CD	2009 D	45.2
1000	8	410 BC	673 A	576 BC	392 B	386 C	306 C	2742 D	32.5
	12	282 BC	542 AB	946 B	1051 A	684 B	502 B	4008 C	32.2
	16	1129 B	656 A	1865 A	1022 A	1218 A	715 A	6606 B	40.2
	20	3530 A	702 A	1917 A	941 A	1263 A	682 AB	9034 A	44.2
P		0.000**	0.011*	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	

VK: Vermikompost, *: %5 düzeyinde önemli, **: %1 düzeyinde önemli, 1.-6.: Yıkama sayıları

Perlit ortamına katılan vermikompost ve artan fosfor uygulamalarının etkilerinin görüldüğü Tablo 1 incelendiğinde, 1. yıkamada yıkanan fosfor miktarının sadece vermikompost uygulama (kontrol) dozundan elde edilen 32 g P₂O₅/da ile 20 kg P₂O₅/da verilen uygulama dozundan elde edilen 3530 g P₂O₅/da arasında değiştiği, düzenli olmamakla birlikte ortama katılan fosfor miktarı arttıkça yıkanan fosfor miktarında da artış olduğu, 1. yıkama sonunda ortamdan yıkanan fosfor miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu görülmektedir.

2. yıkamada yıkanan fosfor miktarının kontrol dozundan elde edilen 331 g P₂O₅/da ile 20 kg P₂O₅/da verilen uygulama dozundan elde edilen 702 g P₂O₅/da arasında değiştiği, düzenli olmamakla birlikte ortama katılan fosfor miktarı arttıkça yıkanan fosfor miktarında artış olduğu, 2. yıkama sonunda ortamdan yıkanan fosfor miktarlarına etkisinin %5 düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir.

3. yıkamada yıkanan fosfor miktarının kontrol dozundan elde edilen 74 g P₂O₅/da ile 20 kg P₂O₅/da verilen uygulama dozundan elde edilen 1917 g P₂O₅/da arasında değiştiği, düzenli olarak ortama katılan fosfor miktarı arttıkça yıkanan fosfor miktarında artış olduğu, 3. yıkama sonunda ortamdan yıkanan fosfor miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu belirlenmiştir.

4. yıkamada yıkanan fosfor miktarının kontrol dozundan elde edilen 36 g P₂O₅/da ile 12 kg P₂O₅/da verilen uygulama dozundan elde edilen 1051 g P₂O₅/da arasında değiştiği, 4. yıkamada fosforun en fazla yıkandığı dozun 12 kg P₂O₅/da dozu olduğu, 4. yıkama sonunda ortamdan yıkanan fosfor miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu saptanmıştır.

5. yıkamada yıkanan fosfor miktarının kontrol dozundan elde edilen 37 g P₂O₅/da ile 20 kg P₂O₅/da verilen uygulama dozundan elde edilen 1263 g P₂O₅/da arasında değiştiği, düzenli olarak ortama katılan fosfor miktarı arttıkça yıkanan fosfor miktarında artış olduğu, 5. yıkama sonunda ortamdan yıkanan fosfor miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu bulunmuştur.

6. yıkamada yıkanan fosfor miktarının kontrol dozundan elde edilen 25 g P₂O₅/da ile 16 kg P₂O₅/da verilen uygulama dozundan elde edilen 715 g P₂O₅/da arasında değiştiği, 6. yıkamada fosforun en fazla yıkandığı dozun 16 kg P₂O₅/da dozu olduğu, 6. yıkama sonunda ortamdan yıkanan fosfor miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu görülmektedir.

Perlit ortamına ilave edilen vermikompost ve artan dozdaki fosfor uygulamalarının toplam 6 yıkama sonucunda kontrol dozundan elde edilen 535 g P₂O₅/da ile 20 kg P₂O₅/da verilen uygulama dozundan elde edilen 9034 g P₂O₅/da arasında değiştiği, düzenli olarak ortama katılan fosfor miktarı arttıkça yıkanan fosfor miktarında da artış olduğu, toplam 6 yıkama sonunda ortamdan yıkanan fosfor miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir.

B. Potasyum yıkama bulguları

Perlit ortamına ilave edilen vermikompost ve artan dozdaki potasyum uygulamalarının yıkanan potasyum miktarlarına olan etkisi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Ortamdan Yıkanan Potasyum Miktarları

VK (kg/da)	K ₂ O(kg/da)	Yıkanan K ₂ O Miktarı (g/da)						Toplam	%
		1.	2.	3.	4.	5.	6.		
0		519 D	37 B	98 C	94 D	98 E	92 C	938 E	-
10		4573 CD	46 B	1150 BC	873 D	1001 DE	273 BC	7916 D	43.9
1000	20	8847 BC	43 B	2525 B	2114 C	2526 CD	1033 B	17089 C	61.0
	30	7362 BCD	73 AB	4981 A	4029 B	3587 BC	2220 A	22251 C	58.5
	40	12207 B	157 A	5271 A	5111 AB	5358 AB	2846 A	30950 B	64.5
	50	18108 A	170 A	6318 A	5458 A	6442 A	2285 A	38781 A	66.8
P		0.001**	0.022*	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	

VK: Vermikompost, *: %5 düzeyinde önemli, **: %1 düzeyinde önemli, 1.-6.: Yıkama sayıları

Perlit ortamına katılan vermikompost ve artan potasyum uygulamalarının etkilerinin görüldüğü Tablo 2 incelendiğinde, 1. yıkamada yıkanan potasyum miktarının kontrol dozundan elde edilen 519 g K₂O/da ile 50 kg K₂O/da verilen uygulama dozundan elde edilen 18108 g K₂O/da arasında değiştiği, düzenli olmamakla birlikte ortama katılan potasyum miktarı arttıkça yıkanan potasyum miktarında artış olduğu, 1. yıkama sonunda ortamdan yıkanan potasyum miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu görülmektedir.

2. yıkamada yıkanan potasyum miktarının kontrol dozundan elde edilen 37 g K₂O/da ile 50 kg K₂O/da verilen uygulama dozundan elde edilen 170 g K₂O/da arasında değiştiği, düzenli olmamakla birlikte ortama katılan potasyum miktarı arttıkça yıkanan potasyum miktarında artış olduğu, 2. yıkama sonunda ortamdaki yıkanan potasyum miktarlarına etkisinin %5 düzeyinde önemli olduğu saptanmıştır.

3. yıkamada yıkanan potasyum miktarının kontrol dozundan elde edilen 98 g K₂O/da ile 50 kg K₂O/da verilen uygulama dozundan elde edilen 6318 g K₂O/da arasında değiştiği, düzenli olarak ortama katılan potasyum miktarı arttıkça yıkanan potasyum miktarında artış olduğu, 3. yıkama sonunda ortamdaki yıkanan potasyum miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu belirlenmiştir.

4. yıkamada yıkanan potasyum miktarının kontrol dozundan elde edilen 94 g K₂O/da ile 50 kg K₂O/da verilen uygulama dozundan elde edilen 5458 g K₂O/da arasında değiştiği, düzenli olarak ortama katılan potasyum miktarı arttıkça yıkanan potasyum miktarında artış olduğu, 4. yıkama sonunda ortamdaki yıkanan potasyum miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir.

5. yıkamada yıkanan potasyum miktarının kontrol dozundan elde edilen 98 g K₂O/da ile 50 kg K₂O/da verilen uygulama dozundan elde edilen 6442 g K₂O/da arasında değiştiği, düzenli olarak ortama katılan potasyum miktarı arttıkça yıkanan potasyum miktarında artış olduğu, 5. yıkama sonunda ortamdaki yıkanan potasyum miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu bulunmuştur.

6. yıkamada yıkanan potasyum miktarının kontrol dozundan elde edilen 92 g K₂O/da ile 40 kg K₂O/da verilen uygulama dozundan elde edilen 2846 g K₂O/da arasında değiştiği, 6. yıkamada potasyumun en fazla yıkandığı dozun 40 kg K₂O/da dozu olduğu, 6. yıkama sonunda ortamdaki yıkanan potasyum miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir.

Perlit ortamına ilave edilen vermikompost ve artan dozdaki potasyum miktarının 6 yıkama sonucunda kontrol dozundan elde edilen 938 g K₂O/da ile 50 kg K₂O/da verilen uygulama dozundan elde edilen 38781 g K₂O/da arasında değiştiği, düzenli olarak ortama katılan potasyum miktarı arttıkça yıkanan potasyum miktarında da artış olduğu, toplam 6 yıkama sonunda ortamdaki yıkanan potasyum miktarlarına etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu belirlenmiştir.

IV. TARTIŞMA VE SONUÇ

Perlit ortamına ilave edilen vermikompost ve artan dozda ilave edilen fosfordan yıkanan fosfor miktarının 6 yıkama sonucunda kontrol uygulamasına göre artan fosfor düzeylerine bağlı olarak arttığı görülmüştür. En fazla artış 4 kg P₂O₅/da düzeyinde (%45.2), en düşük yıkanma ise 12 kg P₂O₅/da düzeyinde (%32.2) bulunmuştur.

Yapılan bir çalışmada vermikompost oluşumu ve organik maddenin ayrışması sırasında ortama malonik asit, fumarik asit, süksinik asit gibi birçok organik bileşiklerin verildiğini ve böylece bitki besin maddelerinin yararıyla arttığı bildirilmiştir [1]. Diğer bir çalışmada, 90 günlük inkübasyonun sonunda vermikompostun topraktaki alınabilir fosfor miktarını %13-26 oranında artırdığı rapor edilmiştir [16]. Ayrıca vermikompostun kaya fosfatta bulunan suda çözünebilir fosfor miktarını olumlu etkilediğini bildirilmiştir [2].

Suda çözünebilir P miktarı 193.62 mg/kg (443.4 mg P₂O₅/kg) ve toplam miktarı 3896.96 mg/kg (8924.0 mg P₂O₅/kg) olan vermikomposttan perlit ortamına 1000 kg/da hesabı ile katıldığında, suda çözünebilir P miktarı 443.4 g P₂O₅/da ve toplam miktarı 8924.0 g P₂O₅/da olmaktadır. Denemede 6 yıkama sonunda yıkanan fosfor miktarı 535 g P₂O₅/da olarak belirlenmiştir. Bu durum vermikomposttaki suda çözünebilir fosforun tamamen yıkandığını, bunun yanı sıra toplam fosfordan da mineralizasyon sonucunda suda çözünebilir şekilde geçen fosforun da bir kısmının (535-443.4=91.6 g/da) yıkandığı saptanmıştır.

Perlit ortamına katılan vermikompost ve 4 kg P₂O₅/kg dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir fosforun (4000+443.4=4443.4 g P₂O₅/da) %45.2'nin yıkandığı hesaplanmıştır. Bu hesaplama dikkate alınarak 8 kg P₂O₅/kg dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir fosforun %32.5, 12 kg P₂O₅/kg dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir fosforun %32.2, 16 kg P₂O₅/kg dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir fosforun %40.2, 20 kg P₂O₅/kg dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir fosforun %44.2 yıkandığı belirlenmiştir. Bu

durumda 8 ve 12 kg P₂O₅/kg dozunda en fazla tutunmanın gerçekleştiği daha az veya daha fazla dozlarda ise tutunmanın daha az olduğu tespit edilmiştir.

Toplam 6 yıkama sonunda yıkanan potasyum miktarının 938 g K₂O/da kontrol uygulaması ile 38781 g K₂O/da (50 kg/da K₂O düzeyi) arasında değiştiği, düzenli olarak ortama katılan potasyum miktarı arttıkça yıkanan potasyum miktarında da artış olduğu belirlenmiştir.

Yapılan bir çalışmada kireçli topraklara 20 g/kg zeolit ve 20 g/kg vermikompost uygulaması ve her iki uygulamanın da topraktaki tüm potasyum formlarını olumlu etkilediği ve ayrıca vermikompostun topraklara salınan toplam potasyumu artırdığı, vermikompost uygulamasının potasyum iyonlarının kil minerallerine (simektit) tutunmasına yardımcı olduğu rapor edilmiştir [15]. Topraklara eklenen organik artıkların toprakların alınabilir K içeriğini önemli derecede etkilediği bildirilmiştir [11, 17].

Suda çözünebilir K miktarı 6683.93 mg/kg (8020.7 mg K₂O/kg) ve toplam miktarı 10137.39 mg/kg (12164.8 mg P₂O₅/kg) olan vermikomposttan perlit ortamına 1000 kg/da hesabı ile katıldığında, suda çözünebilir K miktarı 8020.7 g K₂O/da ve toplam miktarı 12164.8 g K₂O/da olmaktadır. Denemede 6 yıkama sonunda yıkanan potasyum miktarı 938 g K₂O/da olarak belirlenmiştir, bu durum vermikomposttaki suda çözünebilir potasyumun az bir kısmının (%11.7) yıkandığı saptanmıştır.

Perlit ortamına katılan vermikompost ve 10 kg K₂O/da dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir potasyumun (10000+8020.7=18020.7 g K₂O/da) %43.9'un yıkandığı hesaplanmıştır. Bu hesaplama dikkate alınarak 20 kg K₂O/da dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir potasyumun %61.0, 30 kg K₂O/da dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir potasyumun %58.5, 40 kg K₂O/da dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir potasyumun %64.5, 50 kg K₂O/da dozu ile uygulanan toplam suda çözünebilir potasyumun %66.8'inin yıkandığı belirlenmiştir. Bu durumda 10 kg K₂O/kg dozunda en fazla tutunmanın gerçekleştiği daha fazla dozlarda ise tutunmanın daha az olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; perlit ortamına katılan sabit miktardaki vermikomposta ilave edilen artan miktarlardaki fosfor ve potasyum elementlerinin ortamda tutunmaları incelendiğinde; toplam 6 yıkama sonunda düzenli olarak ortama katılan miktarlar arttıkça her iki elementin de yıkanan miktarlarında artış olduğu belirlenmiştir. Ancak, yıkanarak ortamdaki uzaklaşan miktarlar, ortamda bulunan toplam elementin % değeri olarak incelendiğinde; 8 ve 12 kg P₂O₅/kg dozlarında toplam suda çözünebilir fosforun sırası ile %32.5 ve %32.2 oranında yıkanarak en az yıkanmanın dolayısı ile en fazla tutunmanın gerçekleştiği saptanmıştır. Potasyumun ise 10 kg K₂O/da dozunda toplam suda çözünebilir potasyumun %43.9'un yıkandığı ve en fazla tutunmanın bu dozda gerçekleştiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Adhami, E., Hosseini, S., Owliaie H. (2014). Forms of phosphorus of vermicompost produced from leaf compost and sheep dung enriched with rock phosphate. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3, 68. doi:10.1007/s40093-014-0068-9
- [2] Aria, M.M., Lakzian, A., Haghnia, G.H., Berenji A.R., Besharati H., Fotovat A. (2010). Effect of Thiobacillus, sulfur, and vermicompost on the water-soluble phosphorus of hard rock phosphate. *Bioresource Technology*, 101(2), 551–554. doi:10.1016/j.biortech.2009.07.093
- [3] Ashley, M.K., Grant, M., Grabov, A. (2006). Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins. *Journal of Experimental Botany*, 57(2), 425-436. doi:10.1093/jxb/erj034
- [4] Bellitürk, K., Görres, J.H. (2012). Balancing vermicomposting benefits with conservation of soil and ecosystems at risk of earthworm invasions. *8th International Soil Science Congress on "Land Degradation and Challenges in Sustainable Soil Management"*, İzmir.
- [5] Bilen, S., Sezen, Y. (1993). Toprak reaksiyonunun bitki besin elementleri elverişliliği üzerine etkisi 1. Azot, Fosfor ve Potasyum. *Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 156-166.

- [6] Ceylan, Ş., Kılınç, R., Karakaş, D. (2013). Bitlis yöresi topraklarının fosfor adsorpsiyon ve fiksasyon durumlarının nükleer yöntem ile belirlenmesi. *Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, 40(1), 71-78.
- [7] Denli, N. (2015). Marul Yetiştiriciliği. T.C. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Alata Bahçe Kùltürleri Araştırma Enstitüsü, Erdemli-Mersin.
- [8] Edwards, C. A., Bohlen, P.J. (1996). *Biology and Ecology of Earthworms (Third Edition)*. Published by Chapman and Hall, 2-6 Baunday Roww, London SE1 8HN, UK.
- [9] Güllap, M.K., Erkovan, H.İ., Daşcı, M., Koç, A., Alatürk, F. (2009). Fosforlu gübre ve fosfor çözücü bakteri (*Bacillus megaterium* var. *Phosphaticum*) uygulamalarının çayırların verim ve botanik kompozisyonuna etkisi. *Türkiye VIII. Tarla Bitkileri Kongresi*, Hatay.
- [10] Güzel, N., Güllüt, Y.K., Büyük, G. (2002). *Toprak Verimliliği ve Gübreler*. Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Genel Yayınları No: 246, Ders Kitapları Yayın No: 80, Adana.
- [11] Jalali, M. (2011). Comparison of potassium release of organic residues in five calcareous soils of western Iran in laboratory incubation test. *Arid Land Research and Management*, 25, 101-115. doi:10.1080/15324982.2011.554957
- [12] Korkmaz, K., İbrikiçi, H. (2010). Kireçli topraklarda fosfor dinamiğinin belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilim. Derg. (Anadolu J. Agric. Sci.)*, 25(1), 44-52.
- [13] Mtua, K.A., Gökmen, Yılmaz, F., Gezgin, S. (2015). Artan dozlarda TKİ-Hümas ve fosfor uygulamaların kuru fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) bitkisinin gelişimine etkileri. *Selçuk Tarım Bilimleri Dergisi*, 2(2), 84-90.
- [14] Müftüoğlu, N.M., Türkmen C., Çıkkılı Y. (2014). *Toprak ve Bitkide Verimlilik Analizler (2. Basım)*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- [15] Najafi-Ghiri, M. (2014). Effects of zeolite and vermicompost applications on potassium release from calcareous soils. *Soil and Water Res.*, 9, 31-37. doi:10.17721/2012-SWR
- [16] Pramanik, P., Bhattacharya, S., Bhattacharyya, P., Banik, P. (2009). Phosphorous solubilization from rock phosphate in presence of vermicomposts in Aqualfs. *Geoderma* 152(1-2), 16-22. doi:10.1016/j.geoderma.2009.05.013
- [17] Rodriguez, F., Guerrero, C., Moral, R., Ayguade, H., Mataix-Beneyto, J. (2005). Effects of composted and non-composted solid phase of pig slurry on N, P, and K contents in two mediterranean soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(4-6), 635-47. doi:10.1081/CSS-200043305
- [18] Sezen, Y. (1989). Van Gölü Çevresi Toprak Örneklerinde İslatma ve Kurutma ile Potasyum Fiksasyonu. *Atatürk Ü. Zir. Fak. Der.* 20(1), 18-29.
- [19] Sönmez, S., Çıtak, S., Koçak, F., Yaşın, S. (2011). Vermikompost ve ahır gübresi uygulamalarının ıspanak (*Spinacia oleracea* var. L.) bitkisinin gelişimi ve toprak verimliliği üzerine etkileri. *Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Derim Dergisi*, 28 (1), 56-69.
- [20] Szczerba, M.W., Britto, D.T., Balkos, K.D., Kronzucker, H.J. (2008). Alleviation of rapid, futile ammonium cycling at the plasma membrane by potassium reveals K⁺-sensitive and-insensitive components of NH₄⁺ transport. *Journal of Experimental Botany*, 59(2), 303-313. doi:10.1093/jxb/erm309
- [21] Şimşek-Erşahin, Y. (2007). Vermikompost ürünlerinin eldesi ve tarımsal üretimde kullanım alternatifleri. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 99-107.

- [22] Yağmur, B., Eşiyok, D. (2013). Solucan gübresi: vermikompost-III (Vermikompostun Kullanım Alanları) <http://www.dunyagida.com.tr/haber/solucan-gubresi-vermikompost-iiivermikompostun-kullanim- Alanlari/4341> (Erişim tarihi: 15.03.2019).
- [23] Yılmaz, E., Özen, N., Özen, M.Ö. (2016). Determination of changes in yield and quality of tomato seedlings (*Solanum lycopersicon* cv. Sedef F1) in different soilless growing media. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 30(2), 163-168.
- [24] Yurdakul, İ., Usta, S. (2017). Toprak organik maddesi ile fosfor adsorpsiyonu arasındaki ilişkinin Langmuir modeli ile araştırılması. *Toprak-Su Dergisi*, 6(2), 59-70. doi:10.21657/topraksu.339839

Araştırma Makalesi - Research Article

Vatoz (*Dasyatis pastinaca*) Balığı Kas Dokusunun Enzimatik Hidrolizi ve Hidrolizatların Antioksidan ve Bakır Şelatlama Aktivitelerinin Değerlendirilmesi

Ebru Kocadağ Kocazorbaz¹, Meliha Kanatsızoğlu², Hanife Tuğçe Çeker³, Esra Menfaatli^{4*}

Geliş / Received: 26/12/2019

Revize / Revised: 18/06/2020

Kabul / Accepted: 18/06/2020

ÖZ

Biyoaktif peptidler canlıların vücut fonksiyonlarına ve sağlığına olumlu etkileri bulunan spesifik protein fragmentleri olup bitkisel, hayvansal, fungal, bakteriyel ve venom kaynaklı olabilmektedir. Farklı protein kaynaklarından keşfedilen biyoaktif peptidlerin çoğu, antihipertansiyon, antioksidan, antitrombotik, antimikrobiyal ve antikanser immünomodülasyon gibi çeşitli biyolojik özellikler göstermiştir. Bu çalışmanın amacı, vatoz (*Dasyatis pastinaca*) kas dokusu protein hidrolizatının biyolojik aktivitelerinin değerlendirilmesidir. Bu nedenle, vatozun homojenize kas dokusu, esperaz ve tripsin enzimleri tarafından hidrolize edildi. Enzim/substrat oranı, hidroliz süresi ve derecesi optimize edilerek hidrolizatların antioksidan (CUPRAC yöntemi) ve metal şelatlama (bakır şelatlama) aktiviteleri değerlendirildi.

Anahtar Kelimeler- Biyoaktif Peptid, Enzim Atık Hidroliz, Antioksidan, Esperaz, Tripsin

¹İletişim: ebru.kocadag.kocazorbaz@ege.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5611-5235>)

Faculty of Science, Department of Biochemistry, Ege University, Izmir

²İletişim: msomen.1994@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-9547-5444>)

Faculty of Science, Department of Biochemistry, Ege University, Izmir

³İletişim: tugceker159@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-8874-2241>)

Department of Medical Biochemistry, Akdeniz University, Antalya

^{4*}Sorumlu yazar iletişim: esramenfaatli@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-2370-6415>)

Faculty of Science, Department of Biochemistry, Ege University, Izmir

Enzymatic Hydrolysis of Stingray (*Dasyatis pastinaca*) Muscle and Evaluation of Antioxidant and Copper Chelating Activities of the Hydrolysates

ABSTRACT

Bioactive peptides that originate from different sources, such as plant, animal, fungi, bacteria, and venom, are specific protein fragments that have positive effects on the body functions and health of living organisms. Most of the discovered bioactive peptides from different protein sources showed various biological features, such as antihypertension, antioxidant, antithrombotic, antimicrobial, and anticancer immunomodulation. The aim of this study is the evaluation of biological activities of stingray (*Dasyatis pastinaca*) muscle tissue protein hydrolysate. Therefore, the homogenized muscle tissue of stingray was hydrolyzed by esperase and trypsin enzymes. Enzyme/substrate ratio, hydrolysis time, and degree were optimized. Moreover, the antioxidant (CUPRAC method) and metal chelating (copper chelating) activities of the hydrolysates were evaluated.

Keywords- *Bioactive Peptide, Enzymatic Hydrolysis, Antioxidant, Esperase, Trypsin*

I. INTRODUCTION

Bioactive peptides are organic substances consisting of amino acids with potential biological activities. A clear majority of bioactive peptides are generated by the enzymatic hydrolysis while some of them exist free in natural sources [1]. They can affect biological processes and impact health through their bioactive characteristics, such as opiate, antithrombotic, antihypertensive, antioxidant, antibacterial, and fungicidal activities [2].

Marine species comprise half of the total global diversity and they are rich sources of novel compounds and natural molecules for drug evaluation [3]. Marine bioactive peptides are derived from by-products of algae, fish, mollusk, and crustacean such as muscles, viscera, skins, trimmings, and shellfish [4]. Fish processing by-product wastes and underutilized fish proteins are the focus of interest for the production of commercially valuable bioactive components. There are many applications of commercially available nutraceuticals/health foods/functional foods in different countries produced from fish protein hydrolysates [5].

Dasyatis pastinaca (*D. pastinaca*), which is commonly called the stingray, is a marine elasmobranch fish from the Dasyatidae family [6]. There have been several studies to investigate bioactive peptides from stingray [7-10], however, their muscle tissues have yet to be explored for enzymatic hydrolysis-based bioactive peptides. Because of the substrate specificity of the proteases, it is clear that further studies are needed for bioactive peptide research of stingrays. In this paper, we studied enzymatic production of bioactive peptides by enzymatic hydrolysis from stingray (*D. pastinaca*) muscle and evaluated their biological activities, such as antioxidant and metal chelating activity.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Materials

Esperase (Novozyme), trypsin, *N*_α-benzoyl-L-arginine 4-nitroanilide hydrochloride (BAPNA), casein, Folin-Ciocalteu's phenol reagent, murexide, trichloroacetic acid (TCA), neocuproin, CuCl₂, CuSO₄, Na₂CO₃, NH₄CH₃CO₂ were purchased from Sigma Chemical Co. (St. Louis, Mo., U.S.A).

B. Protein extraction from *D. pastinaca* muscle

The spines of the stingray were removed in the laboratory and the skin and muscle flesh were separated. Muscle tissues (27.6 g) of *D. pastinaca* (Figure 1) were cut into small pieces and homogenized in 140 mL of 50 mM Tris/Borate buffer (pH 8.0) with a blender. The crude extract was filtered through glass fiber and centrifuged at 9.000 rpm for 15 min. The supernatant was collected and protein content was measured.



Figure 1. *Dasyatis pastinaca* fragmentation

C. Protein and activity assays

Bradford assay was used to estimate the protein concentrations with some modifications. As the standard known concentrations of bovine serum albumin were used [11]. The proteolytic activity of esperase was estimated with casein as the substrate [12]. The chromogenic substrate BAPNA (*N*_α-Benzoyl-L-arginine 4-nitroanilide hydrochloride) was used for measuring trypsin activity [13].

D. Enzymatic hydrolysis of *D. pastinaca* muscle

D. pastinaca muscle extract was denatured thermally to facilitate hydrolysis and inactivate the endogenous enzymes. The protein concentration of the extract was measured. Optimum enzyme/substrate (E/S) (U/mg protein) ratio was determined for both esperase (6.45 U/mg) and trypsin (2.17 U/mg). Enzyme/substrate ratios of 1.2, 2.4, 3.6, 7.2, and 12 were tested to specify the optimum ratio. Muscle extract was incubated with esperase at 50°C under constant shaking (300rpm) for 30 min, and the reaction was stopped with TCA (10%). On the other hand, muscle extract was incubated with trypsin at 37°C under constant shaking (300rpm) for 30 min with the same E/S ratios mentioned above, and the reaction was stopped with TCA (10%). Hydrolysates were centrifuged at 9000 rpm for 10 min and absorbance of the supernatants was measured at 280 nm. The hydrolysis degree was calculated as the percentage ratio of soluble protein to total protein [14].

$$\text{Hydrolysis Degree (DH) \%} = \frac{\text{mg protein after hydrolysis/mL}}{\text{mg protein before hydrolysis/mL}} \times 100 \quad (1)$$

After designating the optimum E/S ratios, the same experiment was performed to determine the optimum incubation time for enzymatic hydrolysis of *D. pastinaca* muscle (30-240 min) with esperase and trypsin.

E. Determination of antioxidant and metal chelating activity of the peptide hydrolysates

The antioxidant activity of the peptides from *D. pastinaca* muscle hydrolysate was determined using the cupric ions (Cu²⁺) reducing power method (CUPRAC) [15]. Equal volumes of (25 µL) 10 mM CuCl₂·2H₂O, 7.5 mM neocuproine, and 1 M ammonium acetate buffer at pH 7.0 were pipetted into microplate wells respectively. Samples were added to the reaction solution, incubated for 30 min at 37°C, and absorbance was recorded at 450 nm. Ascorbic acid was used as the standard and the total antioxidant capacity was calculated as ascorbic acid equivalent (AAE). The chelating activity of the peptides from *D. pastinaca* muscle hydrolysate was tested by the tetramethyl murexide (TMM) method [16].

III. RESULTS

A. Protein extraction from *D. pastinaca* muscle

It is known that different extraction media are used in protein extraction according to the origin of the proteins, their physicochemical characteristics, and the methods to be used in the identification. Both functional and structural properties of the proteins depend on the amino acid sequences. Therefore, it is not possible to obtain all proteins by a single extraction method since their solubility will vary according to the amino acid components. In this study, the crude extract was used to minimize protein loss. The protein concentration of the extract was 3 mg/mL and the protein acquisition was 12 mg/g muscle tissue.

B. Optimum hydrolysis conditions for esperase and trypsin

Enzyme/substrate ratio and incubation time were optimized for enzymatic hydrolysis of *D. pastinaca* muscle (Table 1). For esperase, as shown in Figure 2, the hydrolysis degree concomitantly increased with the E/S ratio. However, after E/S ratio of 2.4, the rate of increase was fixed thus optimum E/S ratio was chosen as 2.4. The optimum time for hydrolysis was chosen as 2 h according to the results (Figure 3). The results demonstrated that the optimum enzyme/substrate ratio was 1.2 and the optimum incubation time was 2 h for hydrolysis of *D. pastinaca* muscle with trypsin (data not shown). Esperase and especially trypsin are frequently used for protein hydrolysis.

Table 1. Hydrolysis conditions for esperase and trypsin

	Esperase	Trypsin
Buffer	50 mM Tris/Borat (pH 8.2)	50 mM Tris/Borat (pH 8.2)
Temperature (°C)	50	37
E/S	2.4	1.2
Time (h)	2	2

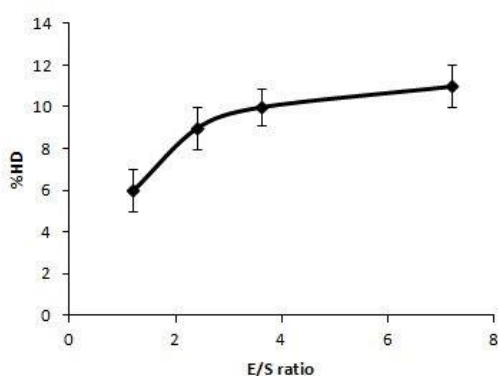


Figure 2. Effect of E/S ratio on the efficiency of hydrolysis for esperase

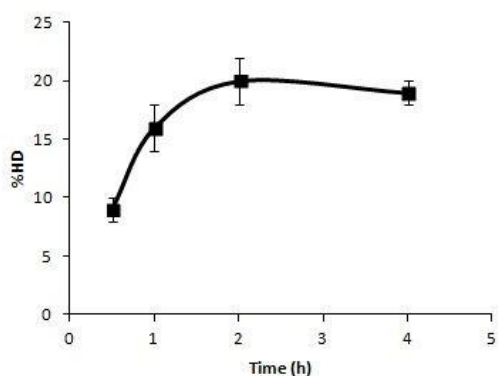


Figure 3. Effect of time on hydrolysis efficiency for esperase

C. Antioxidant activity of peptide hydrolysates

We have used the CUPric Reducing Antioxidant Capacity (CUPRAC) method for the total antioxidant activity of the hydrolysates [15]. The results demonstrate that hydrolysis of *D. pastinaca* muscle with esperase and trypsin reveals protein hydrolysates with efficient antioxidant activity compared to ascorbic acid which is also an effective antioxidant (Table 2). Further investigations are required to enlighten the antioxidant peptide content of the hydrolysates.

Table 2. Antioxidant activities of *D. pastinaca* muscle hydrolysates

Hydrolysate	Protein concentration ($\mu\text{g/mL}$)	Antioxidant activity ($\mu\text{g/mL AAE} / \mu\text{g peptide}$)
Esperase hydrolysate	48	34
Trypsin hydrolysate	57	38
Ascorbic acid _{Control} \rightarrow (25 $\mu\text{g/mL AAE} / \mu\text{g ascorbic acid}$)		

D. Metal chelating activity of peptide hydrolysates

Metal chelating experiments with different concentrations of peptide hydrolysates were measured. Figure 3 shows the copper chelating activity of trypsin and esperase hydrolyzed *D. pastinaca* muscle. When Figure 4 is evaluated, it is observed that protein hydrolysates prepared with two different enzymes have metal

chelating activities and as the concentration increases, the activity of the trypsin hydrolysate continues to increase linearly. Even smaller concentrations of trypsin hydrolysate show higher activity compared to esperase.

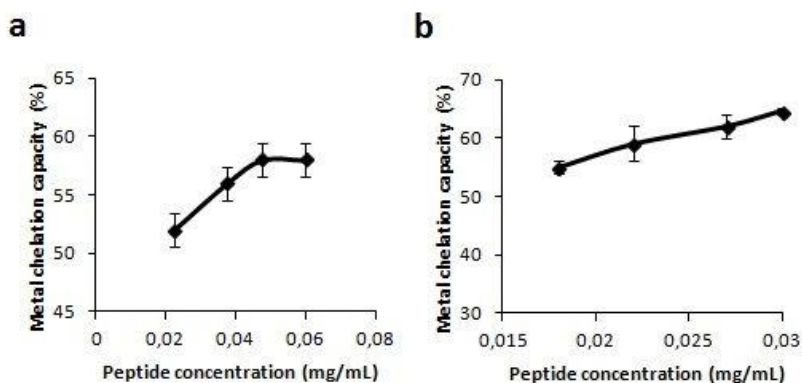


Figure 4. Metal chelating activities of stingray fish muscle hydrolysates: a) Esperase hydrolysate b) Trypsin hydrolysate

IV. DISCUSSION

D. pastinaca of the Dasyatidae family, commonly called name stingray, is a marine elasmobranch fish and lives in Mediterranean coastal areas [17]. Commercial use of stingrays is limited so they are used merely for local dishes and making exotic leather. In this paper, we investigated antioxidant/metal chelating activities of protein hydrolysates obtained through enzymatic hydrolysis of muscle tissue of *D. pastinaca*.

Esperase is a member of the serine protease class, such as trypsin. However, esperases display very broad substrate specificity, unlike trypsin which cleaves peptides on the C-terminal side of lysine and arginine. Therefore, hydrolysis of the protein required esperase activity twice as much as trypsin activity according to results.

Amino acid composition, structure, and hydrophobicity affect the antioxidative properties of the peptides. For example, amino acids with aromatic residues contribute to the radical-scavenging properties of the peptides [18]. In this case, peptides produced by both trypsin and esperase have similar antioxidative properties according to our results. Chai et al. [7] reported that alcalase is the best protease for producing hydrolysates with antioxidant activities (ABTS radical scavenging) comparing to papain and trypsin from blue-spotted stingray (*Dasyatis kuhlii*). Another study with blue-spotted stingray hydrolyzed with alcalase resulted in two antioxidant peptides with ABTS radical scavenging activity [19]. Peptides from trypsin hydrolyzed red stingray (*Dasyatis akajei*) cartilage have shown a potential for inhibition of lipid peroxidation activity [8]. Stingrays can be considered as a good source for antioxidant additives when all these findings are taken into account.

We demonstrated that trypsin was more effective than esperase to produce copper chelating peptides. It is possible that trypsin produced peptides with high-affinity metal-binding groups, such as the imidazole and carboxylic groups, electrostatic and ionic interactions with copper may be enforced [20]. As in the antioxidant activity, according to Chai et al. [7], alcalase is more efficient for generating copper chelating peptides from blue-spotted stingray compared to trypsin.

V. CONCLUSION

Bioactive peptides have been studied extensively in recent years. As a result of many studies, bioactive peptides have important effects on body functions and contribute to the protection of human health in the treatment of chronic diseases or immune system protection. In this study, we aimed to investigate the antioxidant/metal chelating activities of protein hydrolysates obtained through enzymatic hydrolysis from a natural source. For this purpose, muscle tissue extracts of stingray (*D. pastinaca*), which had not been studied

previously, were used as the protein source. E/S ratio and hydrolysis time optimizations were performed for the two different enzymes. When the peptide hydrolysates were evaluated for metal chelation and antioxidant activity, the biological activity of trypsin hydrolysate was found to be better than that of esperase hydrolysate. Further experiments are required for purification/identification and investigating the peptide sequences responsible for antioxidant/metal chelating activities.

REFERENCES

- [1] Sánchez, A., & Vázquez, A. (2017). Bioactive peptides: A review. *Food Quality and Safety*, Volume 1, Issue 1, 1 March 2017, 1(1):29–46
- [2] Bhat, Z.F., Kumar, S., & Bhat, H.F. (2015). Bioactive peptides of animal origin: a review. *J Food Sci Technol*, 52(9):5377–5392
- [3] Aneiros, A., & Garateix, A. (2004). Bioactive peptides from marine sources: pharmacological properties and isolation procedures. *Journal of Chromatography B*, 803 41–53
- [4] Anjum, K., Abbas, S.Q., Akhter, N., Shagufta, B.I., Shah, S.A.A., & Hassan, S.S.U. (2017). Emerging biopharmaceuticals from bioactive peptides derived from marine organisms. *Chem Biol Drug Des*. 90(1):12-30
- [5] Chalamaiah, M., Dinesh Kumar, B., Hemalatha, R., & Jyothirmayi, T. (2012). Fish protein hydrolysates: Proximate composition, amino acid composition, antioxidant activities and applications: A review. *Food Chemistry*, 135:3020–3038
- [6] Yeldan, H., Avsar, D., & Manaşırlı, M. (2009). Age, growth and feeding of the common stingray (*Dasyatis pastinaca*, L., 1758) in the Cilician coastal basin, northeastern Mediterranean Sea. *J. Appl. Ichthyol.*, 25:98–102
- [7] Chai, T.T., Tong, S.R., Law, Y.C., Ismail, N.I.M., Manan, F.A., & Wong, F.C. (2015). Anti-oxidative, metal chelating and radical scavenging effects of protein hydrolysates from blue-spotted stingray. *Trop J Pharm Res*, 14(8):1349–1355
- [8] Pan, X. Y., Wang, Y. M., Li, L., Chi, C. F., & Wang, B. (2019). Four Antioxidant Peptides from Protein Hydrolysate of Red Stingray (*Dasyatis akajei*) Cartilages: Isolation, Identification, and In Vitro Activity Evaluation. *Marine drugs*, 17(5):263
- [9] Conceição, K., Konno, K., Melo, R.L., Marques, E.E., Hiruma-Lima, C.A., Lima, C., Richardson, M., Pimenta, D.C., & Lopes-Ferreira, M. (2006). Orpotrin: A novel vasoconstrictor peptide from the venom of the Brazilian Stingray *Potamotrygon* gr. orbignyi. *Peptides*, 27(12):3039-3046
- [10] Wong, F.C., Xiao, J., Ong, M.G., Pang, M.J., Wong, S.J., Teh, L.K., & Chai, T.T. (2019). Identification and characterization of antioxidant peptides from hydrolysate of blue-spotted stingray and their stability against thermal, pH and simulated gastrointestinal digestion treatments. *Food Chemistry*, 271: 614-622
- [11] Bradford, M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Anal Biochem*, 72:248-254
- [12] Cupp-Enyard, C. (2008). Sigma's non-specific protease activity assay: casein as a substrate. *J. Vis. Exp*, 19-e899
- [13] Erlanger, B.F., Kokowsky, N., & Cohen, W. (1961). The preparation and properties of two new chromogenic substrates of trypsin. *Arch Biochem Biophys*, 95(2):271-278

- [14] Zambrowicz, A., Eckert, E., Pokora, M., Dąbrowska, A., Szoltyś, M., Bobak, Ł., Trziszka, T., & Chrzanowska, J. (2015). Biological activity of egg-yolk protein by-product hydrolysates obtained with the use of non-commercial plant protease. *Italian Journal of Food Science*, 27.4:450-458
- [15] Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., & Karademir, S.E. (2004). Novel Total Antioxidant Capacity Index for Dietary Polyphenols and Vitamins C and E, Using Their Cupric Ion Reducing Capability in the Presence of Neocuproine: CUPRAC Method. *J. Agric. Food Chem.*, 52:7970–7981
- [16] Nakamura-Takada, Y., Shata, H., Minao, M., Ogawa, H., Sekiguchi, N., Murata, M., & Homma, S. (1994). Isolation of a zinc-chelating compound from instant coffee by the tetramethyl murexide method. *Lebensm Wiss Technol*, 27:115–118
- [17] Yeldan, H., Avsar, D. & Manaşırılı, M. (2009). Age, growth and feeding of the common stingray (*Dasyatis pastinaca*, L., 1758) in the Cilician coastal basin, northeastern Mediterranean Sea. *Journal of Applied Ichthyology*, 25: 98-102
- [18] Sarmadi, B.H.& Ismail, A. (2010). Antioxidative peptides from food proteins: A review. *Peptides*, 31(10):1949-1956
- [19] Wong, F., Xiao, J., G-Ling Ong, M, Pang, M., Wong, S., Teh, L., & Chai, T. (2019) Identification and characterization of antioxidant peptides from hydrolysate of blue-spotted stingray and their stability against thermal, pH and simulated gastrointestinal digestion treatments. *Food Chemistry*, 271:614-622
- [20] Zhu, L., Chen, J., Tang, X., & Xiong, Y.L. (2008). Reducing, Radical Scavenging, and Chelation Properties of in Vitro Digests of Alcalase-Treated Zein Hydrolysate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **2008** 56 (8), 2714-2721

Araştırma Makalesi - Research Article

İndüksiyonla Sertleştirilmiş AISI 52100 Rulman Çeliğinin Taşlanması İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerinde Etkisinin Deneysel Analizi

Ufuk Kabasakaloğlu¹, Menderes Kam^{2*}

Geliş / Received: 27/12/2019

Revize / Revised: 15/03/2020

Kabul / Accepted: 15/03/2020

ÖZ

Taşlama işlemi, parçaların optimum yüzey kalitesi, ölçü tamlığında imal edilebilmesi ve yüksek sertliğe sahip olan malzemeleri işlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, taşlama işleminin nihai işlem olmasından dolayı uygun işleme parametreleri seçilerek optimum değerlerin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliği iş parçalarının silindirik taşlama işleminde parametrelerin sertlik ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Taşlama deneyleri; iki farklı taş (Alüminyum oksit - AlO₃ EKR 60 L4V, Silisyum karbür - SCG 60 K6V), iki farklı sertliğe sahip AISI 52100 rulman çeliği iş parçası (56 ve 61 HRC) ve üç farklı kesme derinliği (100, 200, 300 µm) parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada silindirik taşlama işlemi uygulanmış iş parçalarının yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak, artan kesme derinliği ile yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli iyileşmeler görülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri, Alüminyum oksit taşlama taşı ile 61 HRC sertliğe sahip iş parçasında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- AISI 52100, İndüksiyonla Sertleştirme, Sertlik, Taşlama, Yüzey Pürüzlülüğü

¹İletişim: ufukkaba3@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-8731-4955>)

Makine Mühendisliği ABD, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.

^{2*}Sorumlu yazar İletişim: mendereskam@düzce.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9813-559X>)

Makine ve Metal Teknolojileri, Dr. Engin PAK Cumayeri MYO, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.

Experimental Analysis of the Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Grinding of Induction Hardened AISI 52100 Bearing Steel

ABSTRACT

The grinding process is widely used for optimum surface quality of parts, manufacturing accuracy, and processing materials with high hardness. Furthermore, it is of great importance to determine the optimum values by selecting the appropriate parameters because the grinding process is the final process. The aim of this study was to investigate the effects of grinding parameters on hardness and surface roughness in grinding of induction surface hardened AISI 52100 (100Cr6) bearing steel work pieces. Grinding experiments; two different stones (Alumina - A2O3 EKR 60 L4V and silicon carbide - SCG 60 K6V), two different hardness AISI 52100 bearing steel work piece (56 and 61 HRC) and three different depth of cut (100, 200, 300 µm) using parameters were selected. In the experimental study, surface roughness measurements of work pieces in cylindrical grinding process were carried out. As a result, significant improvements in surface roughness values were observed with increasing depth of cut. The lowest surface roughness values were obtained from the work piece (61HRC hardness) with aluminium oxide grinding stone.

Keywords- *AISI 52100, Induction hardening, Grinding, Hardness, Surface roughness.*

I. GİRİŞ

Endüstride bilimsel çalışmalarla birlikte yeni teknolojik gelişmeler yaşanmakta ve kullanılan ürünler de değişmektedir. Bu kapsamda, işleme tekniklerinin doğrudan veya dolaylı olarak etkilendiği işleme süreçleri bulunmaktadır. Bunların işleme sırasında birçok etkisi vardır, bu nedenle işleme parametrelerinin değerleri doğru belirlenmez ise istenen verilerde tam olarak elde edilemeyecektir. Bu bağlamda, rulman çelikleri; sertlik açısından yüksek karbonlu, yorulma dayanımı açısından ise metalürjik kalite çelikleridir. Rulmanlı yataklar, mekanik ekipmanlarda dönmeye imkân sağlamak ve ciddi yükleri taşımak için çokça kullanılan ve temel bir bileşen olarak birçok dönen mekanizmada endüstriyel gelişime önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [1]. AISI 52100 rulman çeliği; kollu kılavuzlarda, freze çakılarında, millerde, hassas parçalarda, burçlarda, yataklarda, rulman bileziğinde, bilyelerde, damgalama araçlarında, dişli takımlarda, kalıplarda, ölçü aletlerinde, pimlerde, sıkma bileziklerde, vidalarda, motor ve pompa parçalarında, anti sürtünme yataklarında, makaralarda ve hidrolik donanım parçalarında kullanımı yaygın olan bir çelik türüdür [2].

Taşlama işlemi, parçaların istenilen konum, şekil ve ölçü hassasiyetinde çıkmasını sağlayan en önemli imalat yöntemlerinden birisidir. Ayrıca, dönen taşlama taşı yüzeyindeki farklı kesme geometrilerine sahip aşındırıcı küçük tanelerin dönen iş parçasına temas noktasında yatay olarak baskı uygulayarak küçük miktarda talaş derinliğinde pasolar ile talaş kaldırılarak parçanın istenen hassas ölçülere getirilmesini sağlayan işlem olarak tanımlanmaktadır. İmalatta taşlama işlemi özellikle; ölçü tamlığı, dairesellik, yüzey kalitesi ve hassas toleransların istendiği havacılık, otomotiv, ulaşım, tıbbi cihazlar ve elektronik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında ölçme aletleri, kızak ve kayıtlar, miller, dişli çarklar, merdane ve yatak bilezikleri gibi makine bileşenlerinin yüzeylerinin de hassas olması gereklidir. Aynı zamanda bu yüzeylerin korozyona karşı dayanıklı olabilmesi içinde taşlama işlemi uygulanmaktadır [3-7].

Literatürde, AISI 52100 rulman çeliğinin taşlanabilirliği ile ilgili yapılan birçok çalışma mevcuttur [5-12]. Ancak, indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış AISI 52100 rulman çeliğinin taşlanabilirliğinin deneysel incelenmesi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma vardır. Günümüzde ise taşlama işlemi, imalat süreçlerinin en önemli aşamalarından biri olmuştur. Bu nedenle taşlama işleminde sağlanacak iyileşmeler sayesinde büyük maddi kazançlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

İmalatta, taşlama işleminin son işlem olması nedeniyle uygun parametreler seçilerek optimum değerler elde edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bununla birlikte yüksek verimlilikle, az maliyetle ve kısa sürede kabul edilebilecek yüzey kalitelerinin elde edilebilmesi uygun işleme parametreleri seçimi ile mümkündür. Uygun belirlenmeyen parametreler ise taşlama taşlarının çatlaması veya kırılması, hızlı aşınması ve yanması gibi ekonomik kayıpların yanında, parçaların zarar görmesi veya tekrar işleme gerek duyulması, yüzey kalitesinin bozulması gibi maddi kayıp ve çok zaman harcanmasına sebep olmaktadır. Diğer yandan sertleştirilmiş parçalarında taşlanması gerekmektedir. Sertleştirme işlemi uygulanmış parçaların çalışma şartları göz önüne alındığında, tamamen sertleştirilmesinin istendiği durumlarla birlikte, bazen gerekli kısımlarının sertleştirilmesi de talep edilmektedir. Genel olarak makine bileşenlerinin aşınmaması gereken yüzeylerin sertleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle, darbeli ve vuruntulu çalışma koşulları için çeliğin çekirdeğine kadar sertleşmemesi daha uygun olmaktadır. Bu sebeple çelik malzemeler, yalnız yüzeyinin sertleştirilmesi yani ince bir katmanın (sertlik derinliği) sertleştirilmesi ile çalışma koşulları için uygun olarak hazırlanırlar ve bu işleme de yüzey sertleştirilmesi adı verilmektedir. Yüzey sertleştirme uygulamaları ile aşınma dayanımının artırılması ile eğme, bükme gibi tekrarlı yüklemelere maruz parçalarda yorulma dayanımı artırılabilir. İnce cidarlı, değişik kesitli parçalarda çarpılma veya sertleştirme (su verme) çatlamaları riski en aza indirilmektedir. Aşınma dayanımı yüksek, teknik öneme sahip parçalarda aranan, merkez bölgesinde yüksek bir mukavemet, yanında yeterli derecede tokluk ve sünekliğe sahip olma beklentisi yerine getirilmektedir. Parçalardan beklenen işleve göre, bu iyileştirmelerden birisi ön plana çıkabilmekte, uygulanacak yüzey işlemi ve işleme ilişkin parametreler de buna göre tayin edilmektedir. Yüzey bölgesinin teknik özelliklerini değiştirmek için başvuru yüzey sertleştirme yöntemleri parçadan beklenen fonksiyona, mevcut malzemenin bileşimine, parçanın hassasiyetine ve göze alınan maliyete bağlı olarak seçilmektedir [7-12]. Bu bağlamda, indüksiyonla sertleştirme işlemi son yıllarda metallerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan ısıtma yöntemlerinden birisidir. İndüksiyonla sertleştirilmiş ve hassas taşlanmış miller endüstrinin birçok alanında özellikle otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Millerden istenilen, yükleri taşımanın yanı sıra sorunsuz bir şekilde ömürlerini tamamlamalarıdır. İndüksiyonla sertleştirme işlemi, sementasyon ile elde edilemeyen uygun çekirdek özellikleri,

yüksek sertlik derinliği gibi özelliklerin elde edilebilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek torkla çalışması sebebiyle fazla sertlik verilemeyen millerin aşınma dayanımı gerektiren kısımların indüksiyonla sertleştirilmesi örnek olarak verilebilir [13-15]. İndüksiyonla sertleştirme işlemi ve farklı ısıl işlemler uygulanmış miller ile ilgili birçok deneysel çalışma yapılmıştır [16-22].

Yüzey pürüzlülüğü; sadece aşınma, yorulma, sürtünme ve yağlama gibi tribolojik olarak değil aynı zamanda sızdırmazlık, elektrik, ısı iletimi vb. gibi farklı alanlarda da dikkate alınması gereken önemli bir etkidir. Bu nedenle makine bileşenlerinde yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenmesi çok önemlidir. Bu kapsamda, maksimum tepe-çukur yüksekliği (Rt), ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) ve on nokta yüksekliği (Rz) gibi pürüzlülük parametreleri ölçülebilir. Bu pürüzlülük parametrelerinden en yaygın kullanılanı, dünya çapında kabul görmüş ve ülkemizde de kullanılan Ra'dır [12].

Silindirik taşlama taşlarını oluşturan tanelerin taş üzerinden sökülebilmeye özelliğine göre tanelerin birbirine olan bağlantı kuvvetine sertlik denir. Taşlama taşı talaş kaldırma yaparken taşı oluşturan aşındırıcı taneler birleştirme aracı tarafından kolayca bırakılıyor veya aşındırıcı tane yerinden kolayca çıkmıyorsa buna yumuşak taşlama taşı denir. Aşındırıcı taneler yuvasını kolayca çıkmıyor veya birleştirme aracı aşındırıcı taneyi kolayca bırakmıyorsa buna da sert taşlama taşı denir. Bundan dolayı genel olarak malzemelerin cinsine göre yumuşak ya da sert taşlama taşı seçimi yapılmaktadır [4-6].

Bu çalışmada, indüksiyonla yüzey sertleştirilmiş AISI 52100 (56 ve 61 HRC) rulman çeliğinin silindirik taşlanmasında parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve sertlik (HRC) üzerindeki etkilerin ortaya konulması, uygun parametre ve taş seçimi ile taşlanan iş parçasının yüzey kalitesinin artırılması amaçlanmıştır.

II. MATERYEL VE METOT

Bu çalışmada, indüksiyonla yüzeyleri sertleştirilmiş AISI 52100 rulman çeliği iş parçalarının taşlama işleminde işleme parametrelerinin sertlik ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliğinin kimyasal bileşimi (%) Tablo 1'de verilmiştir. AISI 52100 rulman çeliği (Çap 20x300 mm) iş parçalarına indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış ve yüzey sertlikleri 56 HRC, 61 HRC değerine getirilmiş ve iş parçası üzerinde sertlik derinlikleri 3 mm olarak ölçülmüştür.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliğinin kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Fe
(%)	0,973	0,27	0,33	0,016	0,001	1,41	0,02	0,025	Kalan

Taşlama deneyleri; iki farklı taş (Alüminyum oksit - Al₂O₃ EKR 60 L4V, Silisyum karbür - SCG 60 K6V), indüksiyonla yüzeyleri sertleştirilmiş AISI 52100 çeliği iş parçaları (56 ve 61 HRC) ve üç farklı kesme derinliği (100, 200, 300 µm) parametreleri kullanılarak Şekil 1'de verilen silindirik taşlama tezgâhında (SMARC M1432B/1500) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan silindirik taşlama tezgâhının teknik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Silindirik taşlama tezgâhı

Tablo 2. Silindirik taşlama tezgâhının teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Toplam tezgâh gücü	5,5 kW
İş mili devri	1500 dev/dak
Taşlama uzunluğu	1500/125 mm
Maksimum bağlanabilecek parça uzunluğu	8-30/100-320 mm
İş tablası hızı	0,1-4 m/dak

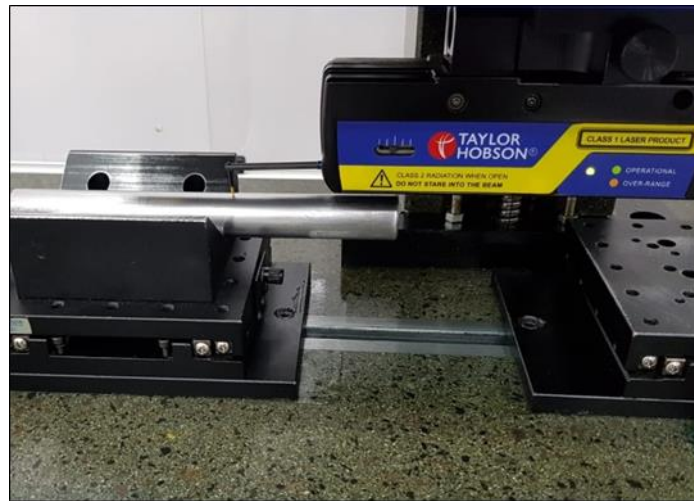
Taşlama deneylerinde AISI 52100 rulman çeliği iş parçalarının taşlanması için kullanılan parametreler, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinlikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. İndüksiyonla sertleştirme işlemi uygulanmış AISI 52100 çeliğinin taşlanabilirliğinin incelenmesi amacıyla kullanılan taşlama parametreleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Taşlama parametreleri

Taşlama parametreleri	
Deney numuneleri (2 Adet)	İndüksiyonla yüzeyleri sertleştirilmiş AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliği iş parçaları (Sertlik derinliği 3 mm) Çap 20x300 mm (56 HRc ve 61 HRc)
Taşların cinsi (2 Adet)	Alüminyum oksit-EKR 60 L4V, Silisyum karbür -SCG 60 K6V
Taşlama taşı boyutları (mm)	400x20 50x203.2
Kesme derinliği (μ m)	100, 200, 300
Tabla hızı (m/dak)	0.12
İş parçası devir sayısı (dev/dak)	135

Tablo 3’de taşların cinsi Alüminyum oksit - EKR 60 L4V, Silisyum karbür - SCG 60 K6V olarak verilmiştir. Taşların sertlikleri Alüminyum oksit taş için L orta sertlikte ve Silisyum karbür taş için ise yumuşak sertlikte olan K olarak verilmiştir. Taşların tane boyutları ise 60 normal tane boyutlarına sahiptir. Bu deneysel çalışmada, tüm taşlama deneyleri soğutma sıvısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taşlama deneylerinde; her iş parçası 300 mm taşlama mesafesinde iki gidiş geliş olacak şekilde ve belirlenen parametreler kullanılarak silindirik taşlama işlemi uygulanmıştır. Ayrıca, taşlama taşlarının bilenmesi için tek taneli bileme elması kullanılmış ve her taşlama deneyi yapıldıktan sonra aynı şartlarda aynı bileme yöntemi kullanılarak taşlama taşı bileme elması ile 0,02 mm pasolarla 4 kez gidip gelerek bileme işlemi yapılmıştır.

Silindirik taşlama deneyleri uygulanan AISI 52100 rulman çeliği iş parçalarının yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Taylor Hobson marka Talysurf PGI 830 form ve pürüzlülük cihazında gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçümü Şekil 2’de gösterilmiştir. Her numune için üçer adet ölçüm yapılarak elde edilen verilerin aritmetik ortalamaları alınmış ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir.



Şekil 2. Yüzey pürüzlülük ölçümü

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

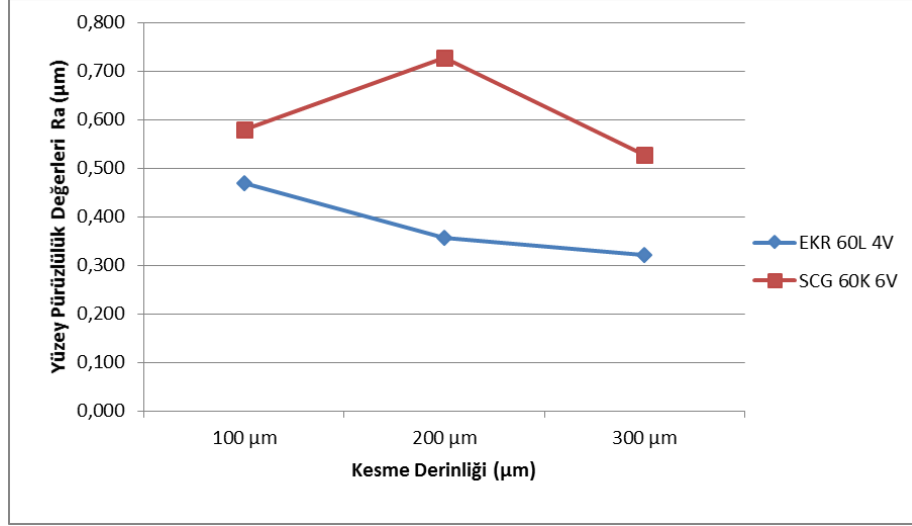
Silindirik taşlama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra, Rz ve Rt) Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. Elde edilen bulgulardan ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri (56 HRC) Şekil 3'te ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri (61 HRC) Şekil 4'da grafik olarak gösterilmiştir. Bulgulara göre, yüzey sertlik değeri yüksek olan iş parçasında daha iyi yüzey kalitesi ve dolayısı ile daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte sertliğin artmasından dolayı iş parçalarının taşlanabilirliği iyileşmiştir. Sertliğin artması ile taşlanabilirliğin iyileşmesi, aynı kesme şartları altında sert malzemelerde yumuşak malzemelere göre daha iyi yüzey kalitesinin elde edilmesi ile ilişkilendirilmiştir [12]. Kesme derinliği arttıkça parçalarda daha düşük Ra değerleri elde edilmiştir. Artan kesme derinliği ile yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli iyileşmeler görülmüştür. Silindirik taşlama deneylerinde taşları (Alüminyum oksit - EKR 60 L4V, Silisyum karbür - SCG 60 K6V) karşılaştırdığımızda, Alüminyum oksit taşlama taşı ile yapılan deneylerde elde edilen Ra değerlerinin Silisyum karbür taşlama taşı ile yapılan taşlama deneylerinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Alüminyum oksit taşlama taşı ile daha pürüzsüz yüzeylerin elde edilebildiği görülmüştür. Bu durum, Alüminyum oksit taşlama taşının ısı iletkenliğinin Silisyum karbür taşlama taşının ısı iletkenliğinden daha büyük olması ile ilişkilendirilebilir. Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım veya iş parçası malzemesinin termal iletkenliğinin yüksek olması, kesme esnasında kesme bölgesinde oluşan yüksek ısılarda daha çabuk ve kolay uzaklaştırılması anlamına geleceğinden özellikle taşlama işleminde işlenen yüzeylerde daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilebilmektedir. Bu durum, literatürde yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir [9, 16].

Tablo 4. Taşlama deneyleri yüzey pürüzlülüğü değerleri (56 HRC)

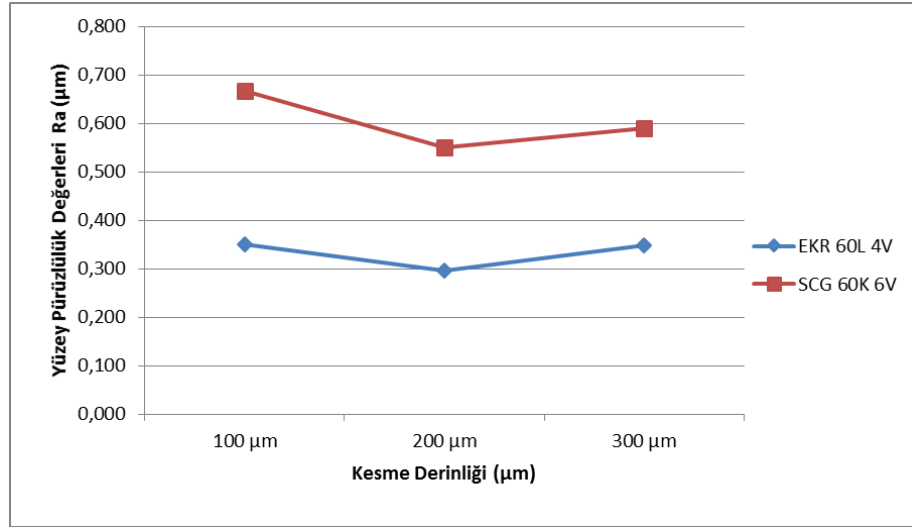
Taşın Cinsi	Kesme Derinliği (µm)	Yüzey Pürüzlülük Değerleri (µm)		
		Ra	Rt	Rz
Alüminyum oksit Al ₂ O ₃ EKR 60 L4V	100	0,470	4,103	2,305
	200	0,357	3,633	1,847
	300	0,322	2,532	1,618
Silisyum karbür SCG 60 K6V	100	0,579	4,928	2,736
	200	0,727	5,935	3,380
	300	0,527	3,740	2,575

Tablo 5. Taşlama deneyleri yüzey pürüzlülüğü değerleri (61 HRC)

Taşın Cinsi	Kesme Derinliği (µm)	Yüzey Pürüzlülük Değerleri (µm)		
		Ra	Rt	Rz
Alüminyum oksit Al ₂ O ₃ EKR 60 L4V	100	0,350	3,300	2,053
	200	0,296	2,645	1,694
	300	0,349	2,616	1,835
Silisyum karbür SCG 60 K6V	100	0,667	5,612	3,290
	200	0,550	4,557	2,995
	300	0,589	4,703	3,177



Şekil 3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri, 56 HRC (µm)



Şekil 4. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri, 61 HRC (µm)

Taşılama deneylerinde her iki yüzey sertliğine sahip iş parçasında (56 ve 61 HRC) taşılama taşı sertliğinin yüzey pürüzlülüğü oluşumunda önemli derecede etkili olduğu görülmüştür. Taş sertliğinin artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinde de artış olduğu görülmüştür. En yüksek “Ra” değeri 56 HRC yüzey sertlik değerine sahip iş parçasında ve 200 µm kesme derinliğinde Silisyum karbür taş ile 0,727 µm yüzey pürüzlülüğü değeri bulunmuştur. En düşük “Ra” değeri ise 61 HRC yüzey sertlik değerine sahip iş parçasında ve 200 µm kesme derinliğinde Alüminyum oksit taşılama taşı ile 0,296 µm elde edilmiştir. Yukarıda bahsedildiği gibi taşılama sürecinde yüksek sertlik değerlerine sahip iş parçasında daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilebildiği görülmüştür. Bununla birlikte Tablo 4 ve Tablo 5’te verilen Rz ve Rt değerlerinin de Ra değerlerini doğrular nitelikte olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, Taşılama işlemlerinde kullanılan her iki taşında tane sayılarının aynı

olduğu göz önünde bulundurduğumuzda yumuşak sertlikteki taşa göre orta sertlikteki taş ile daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilebildiği gözlenmiştir.

IV. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış AISI 52100 rulman çeliği iş parçalarının silindirik taşlanma işleminde parametrelerin sertlik ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel olarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Taşlama işlemlerinde her iki yüzey sertliğine sahip iş parçasında (56 ve 61 HRc) taşlama taşı sertliğinin yüzey pürüzlülüğünü önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir.
- Taşlama işlemlerinde yumuşak sertlikteki taşa göre orta sertlikteki taş ile daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilebildiği gözlenmiştir.
- 56 HRc yüzey sertliğine sahip AISI 52100 iş parçasında, “Alüminyum oksit” taşlama taşı ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine oranladığımızda, “Silisyum karbür” taşlama taşı ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık olarak % 35 daha yüksek çıkmıştır.
- 61 HRc yüzey sertliğine sahip AISI 52100 iş parçasında, “Alüminyum oksit” taşlama taşı elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine oranladığımızda, “Silisyum karbür” taşlama taşı ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri % 40 daha yüksek çıkmıştır.
- Silindirik taşlama işlemlerinde, yüksek sertlik değerlerine sahip iş parçalarında daha pürüzsüz yüzeyler elde edilebildiği bulunmuştur.
- En düşük Ra değerleri ise 61 HRc yüzey sertlik değerine sahip iş parçasında ve 200 µm kesme derinliğinde Alüminyum oksit taşlama taşı ile 0,296 µm olarak elde edilmiştir.
- En yüksek Ra değeri ise 56 HRc sertlik değerine sahip iş parçasında ve 200 µm kesme derinliğinde Silisyum karbür taşlama taşı ile 0,727 µm olarak bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Tonicello, E., Girodin, D., Sidoroff, C., Fazekas, A., & Perez, M. (2012). Rolling bearing applications: some trends in materials and heat treatments, *Materials Science and Technology*, vol. 28, pp. 23-26.
- [2] Ballıkaya, H. (2011). 100Cr6 Çeliğinin Teğetsel Tornalama-Frezeleme Yöntemi İle İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ,.
- [3] Shah, S. M. A. (2011). Prediction of residual stresses due to grinding with phase transformation”, PhD. Thesis, Institut National Des Sciences Appliquees De Lyon, Lyon, France.
- [4] Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M., & Altunpak, Y. (2013). Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri, Üçüncü baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [5] Demir, H., & Güllü, A. (2001).Taşlamada Parametrelerin Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 189-198.
- [6] Demir, H., & Güllü, A. (2008). Taş dokusunun yüzey pürüzlülüğü ve taşlama kuvvetlerine etkilerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1).

- [7] Tonshoff, H. K., Friemuth, T., & Becker, J.C. (2002). Process monitoring in grinding, *Annals of the CIRP*, vol. 51, no. 2, pp. 551-571.
- [8] Bhaduri, D., & Chattopadhyay, A. K. (2010). Effect of pulsed DC CFUBM sputtered TiN coating on performance of nickel electroplated monolayer cBN wheel in grinding steel, *Surface and Coatings Technology*, vol. 204, no. 23, pp. 3818-3832.
- [9] Demirci, A. H. (2004). Mühendislik malzemeleri: önemli endüstriyel malzemeler ve ısı işlemleri, *Aktüel yayınları*, 25, 74-75.
- [10] Atakök, G. (2008). CNC tornada talaş kaldırma işlemlerinde talaş kırıcı geometrisinin işlenebilirliğe etkilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Kurt, M., Köklü, U., Atakök, G., & Bakır, B. (2012). An Experimental and Statistical Investigation on Shape Error in Interrupted Grinding”, *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, vol. 1, pp. 77-81.
- [12] Khan, A. A., Ndaliman, M. B., Md. Soot, H. B. & Ishak, N. B. (2012). Influence of thermal conductivity of electrodes on EDM process parameters”, *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 6, no. 9, pp. 337-345.
- [13] Metal Handbook, *Heat Treating*, 9th ed., Ohio, 1985.
- [14] Duran M. C. (2016). 100Cr6 çeliğinden burç imalatında indüksiyonla yüzey sertleştirme uygulaması ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [15] Altinel K. (2015). Rot başlarında indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin ömür ve mekanik kuvvet dayanımına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- [16] Kabasakaloğlu U. (2018). İndüksiyonla sertleştirilmiş millerin dinamik davranışlarının deneysel analizi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- [17] Kabasakaloğlu U. & Saruhan, H. (2019). Effects of induction hardened surface depth on the dynamic behavior of rotating shaft systems, *Materials Testing*, vol. 61, no: 3, pp. 277-281.
- [18] Kam, M., Saruhan, H., & Kabasakaloğlu, U. (2016). Experimental investigation of vibration generated from the cryogenic treated and induction surface hardened rotating shafts, *3rd International Symposium on Railway Systems Engineering (ISERSE'16)*, 142-148.
- [19] Kam, M., Saruhan, H., & Guney, T. (2016). Kriyojenik işlem ve sıcak dövme işlemi uygulanmış millerin deneysel titreşim analizi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(3), 21-30.
- [20] Alçelik, N. & Kam, M. (2020). Dönen Makinelerde Eksenel Kaçıklık ve Dengesizliğin Titreşim Analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (), 263-275 . DOI: 10.35193/bseufbd.669289.
- [21] Kam, M., & Saruhan, H. (2019). Kriyojenik işlem uygulanmış millerin yuvarlanmalı ve kaymalı yataklarda deneysel titreşim analizi. *Politeknik Dergisi*, 22(1), 129-134.
- [22] Saruhan, H., & Kam, M. (2016). Experimental spectral analysis of split sleeve bearing clearance effect on a rotating shaft system. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 13(4), 1-8.

Araştırma Makalesi - Research Article

Modifiye Edilmiş Coulomb Potansiyeli Conformable Sturm-Liouville Problemi

Erdal Baş^{1*}, Isam Najemdeen²

Geliş / Received: 31/12/2019

Revize / Revised: 13/06/2020

Kabul / Accepted: 25/06/2020

ÖZ

Bu makalede, modifiye edilmiş Coulomb Potansiyeli sahip Sturm Liouville probleminin uyumlu mertebeli versiyonu elde edilmiştir. Çalışılan sistem sınır koşullarıyla Sturm Liouville operatörünün uyumlu türevli daha genel bir formatı ispatlanmıştır. Ayrıca, gözününe alınan bu problem için özdeğerlerin reelliği ve özfonksiyonların α - ortoganallığını ispatlanmıştır. İlaveten modifiye edilmiş Coulomb Potansiyeli sahip Sturm Liouville probleminin çözümünün görüntüsü bulunmuştur. Sonuçlar grafiklerle karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Conformable (uyumlu) Türev, Özdeğer, Özfonksiyonlar, Spektral, Coulomb Potansiyeli

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: erdalmat@yahoo.com (<https://orcid.org/0000-0002-2275-8061>)

Matematik Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

²İletişim: isammath94@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1344-9977>)

University of Zakho, Iraq

Conformable Sturm-Liouville Problem with Modified Coulomb Potential

ABSTRACT

In this paper, Conformable derivative order version of the Sturm-Liouville problem having modified Coulomb potential is obtained. The studied system proves the shape of the conformable derivative general statement of the Sturm-Liouville operator with boundary conditions. Furthermore, real of eigenvalues and α -orthogonal of eigenfunctions have been proved for the problem considered. Additionally, the representation of the solution of the Sturm-Liouville problem having modified Coulomb potential is found. The results are shown comparatively by figures.

Keywords-Conformable Derivative, Eigenvalue, Eigenfunctions, Spectral, Coulomb Potential

I. INTRODUCTION

The idea of the fractional computation is as old as usual calculus. This concept was made when L'Hospital in 1695 asked specifically what does the means of $\frac{d^n f}{dx^n}$ where $n = \frac{1}{2}$. From that time on, intensive research of fractional calculus in the last and current centuries has performed many types of research[1–4]. Some researchers like Fourier, Liouville, Weyl, Riemann, Abel, Leibniz, Grünwald, and Letnikov attempted to put a definition of the fractional derivative. Some of them used an integral form for the fractional derivative. From these outcomes, the most well-known notions of the fractional derivative are Riemann–Liouville definition also Caputo definition[5–8].

I. Riemann–Liouville definition. Assume that $0 < \alpha \leq 1$. Then the derivative of the function f with order α is defined by

$$D_a^\alpha(f)(t) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \left[\int_a^t \frac{f(x)}{(t - x)^{\alpha - n + 1}} dx \right]. \quad (1)$$

II. Caputo definition. The derivative of the function f with order α for $\alpha \in [n - 1, n)$ is defined as follows

$$D_a^\alpha(f)(t) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \left[\int_a^t \frac{f^{(n)}(x)}{(t - x)^{\alpha - n + 1}} dx \right]. \quad (2)$$

Where D_a^α is an operator of the left fractional derivative and $\frac{d^n}{dt^n}$ is an operator of the derivative with integer order, the acquired fractional derivatives in this measurement appeared difficult also do not satisfy some of the main properties the same as normal derivatives for example chain rule, the product rule, and so on. The concept Riemann–Liouville derivative does not fulfill $D_a^\alpha(1) = 0$, (${}^c D_a^\alpha(1) = 0$ for the Caputo definition), where α does not belong to a natural number. However, some properties of these fragmentary administrators carry on well at times[9-10]. In recent times, Khalil et al. give a new-well definition of local derivative named conformable derivative which is applied a limit form same ordinary derivative form and satisfies all previous properties. Additionally, they define a conformable integral with order $\alpha \in (0, 1]$. They also really evaluated and showed conformable Rolle's theorem and mean value theorem through definition that founded by them [11]–[14].

II. BASIC DEFINITION AND THEOREM

Definition 2.1. [11] Assume that $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ be a function, then the definition of the left conformable derivative of the function f with order α , where $0 < \alpha \leq 1$ is defined as follows

$$(T_a^\alpha f)(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(t + \varepsilon(t - a)^{1 - \alpha}) - f(t)}{\varepsilon}, \quad (3)$$

for every $t > a$. write T_a^α , where $a = 0$. If $(T_a^\alpha f)(t)$ exists on (a, b) , then we have

$$(T_a^\alpha f)(a) = \lim_{t \rightarrow a^+} (T_a^\alpha f)(t). \quad (4)$$

In [15] let us f be a differentiable function on the interval (a, b) and $\alpha \in (0, 1]$, so that

$$(T_a^\alpha f)(t) = (t - a)^{1 - \alpha} f'(x). \quad (5)$$

Definition 2.2. [11] The right conformable derivative of $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ with order $\alpha, \alpha \in (0, 1]$ is defined as follows

$$({}^b_{\alpha}Tf)(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(t + \varepsilon(b-t)^{1-\alpha}) - f(t)}{\varepsilon}, \quad (6)$$

for every $t < b$. We write ${}_{\alpha}T$, where $b = 0$. If $({}^b_{\alpha}Tf)(t)$ exists on (a, b) , then we have

$$({}^b_{\alpha}Tf)(b) = \lim_{t \rightarrow b^-} ({}^b_{\alpha}Tf)(t). \quad (7)$$

In [15] if f is differentiable function on the interval (a, b) , then we can define the right conformable derivative of $0 < \alpha \leq 1$ as

$$({}^b_{\alpha}Tf)(t) = -(b-t)^{1-\alpha} f'(t). \quad (8)$$

If the conformable derivative of the function f exists, then the given function f is said to be α -differentiable [16].

Definition 2.3. [16] Suppose that $\alpha \in (n, n+1]$ for $n \in \mathbb{N}$, and f be n -differentiable function at a point $t > 0$, the conformable derivative with order α of f is defined by

$$(T_{\alpha}f)(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f^{([\alpha]-1)}(t + \varepsilon t^{[\alpha]-\alpha}) - f^{([\alpha]-1)}(t)}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Where $[\alpha]$ be the smallest integer number that greater or equal to α . Besides, for $\alpha \in (n, n+1]$, n is a positive integer we can say that

$$(T_{\alpha}f)(t) = t^{([\alpha]-\alpha)} f^{([\alpha]}(t). \quad (9)$$

From the above definition, we can say f is $(n+1)$ -differentiable function at non-negative number t .

Definition 2.4. [15] Assume that $f: (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ be a given function and $\alpha \in (0, 1]$. so that, the definition of left conformable integral of f with order α is given by

$$\begin{aligned} (I_{\alpha}^a f)(t) &= \int_a^t f(x) d_{\alpha}x \\ &= \int_a^t (x-a)^{\alpha-1} f(x) dx. \end{aligned} \quad (10)$$

We are writing I_{α} and $d_{\alpha}x$ where $a = 0$.

Definition 2.5. [15] The right conformable integral with order α of the function f where $f: (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ and $\alpha \in (0, 1]$ is defined by

$$\begin{aligned}
 ({}^b I f)(t) &= \int_t^b f(x) d_\alpha(b, x) \\
 &= \int_t^b (b-x)^{\alpha-1} f(x) dx.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

If $b = 0$, then we write ${}_\alpha I$ and $d_\alpha x$.

Definition 2.6. [15] Let f be a given function and $\beta = \alpha - n$ where $0 < \alpha \leq 1$, then the left conformable integral definition that starting from $a > 0$ of f is

$$(I_\alpha^a f)(t) = I_{n+1}^a((t-a)^{\beta-1} f) = \frac{1}{n!} \left[\int_a^t (t-x)^n (x-a)^{\beta-1} f(x) dx \right].
 \tag{12}$$

Perceive that if $\alpha = n + 1$, then we obtain $\beta = 1$. Therefore, by way of Cauchy formula, the iterative integral of f over $n + 1$ times on the interval $(a, t]$ is provided

$$(I_\alpha^a f)(t) = (I_{n+1}^a f)(t) = \frac{1}{n!} \left[\int_a^t (t-x)^n f(x) dx \right].
 \tag{13}$$

Theorem 2.7. [15] Assume that $\alpha \in (0, 1]$ and $f: (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ be given continuous function, for every $t > a$

$$T_\alpha^a I_\alpha^a f(t) = f(t).
 \tag{14}$$

And

$${}^b T_\alpha^b I f(t) = f(t).
 \tag{15}$$

If $f^n(t)$ is continuous, then for $\alpha \in (n, n + 1]$ both equations (15) and (16) hold.

Lemma 2.8. [15] Assume $0 < \alpha \leq 1$ and $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ be a differentiable function, then for all $t > 0$

$$I_\alpha^a T_\alpha^a f(t) = f(t) - f(a).
 \tag{16}$$

And

$${}^b I_\alpha^b T_\alpha^b f(t) = f(t) - f(b).
 \tag{17}$$

Theorem 2.9. [15] (Conformable integration by parts). Assume that f and g be two given differentiable functions such that $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, then

$$\int_a^b f(x) T_\alpha^a(g)(x) d_\alpha(x, a) = fg|_a^b - \int_a^b g(x) T_\alpha^a(f)(x) d_\alpha(x, a). \quad (18)$$

Theorem 2.10.[17] Let p be a point in real number, then for $p \geq 1$ the set $L_\alpha^p([a, b], \mathbb{R})$, ($a \geq 0$) be a Banach space along with the norm such that defined for $f \in L_\alpha^p([a, b], \mathbb{R})$ as

$$\|f\|_{L_\alpha^p([a, b], \mathbb{R})} = \left(\int_a^b |f(t)|^p d_\alpha t \right)^{1/p}. \quad (19)$$

Furthermore, space $L_\alpha^2([a, b], \mathbb{R})$ is a Hilbert space along with inner product provided for all $(f, g) \in L_\alpha^p([a, b], \mathbb{R}) \times L_\alpha^p([a, b], \mathbb{R})$

$$\langle f, g \rangle_{L_\alpha^2([a, b], \mathbb{R})} = \int_a^b f(t)g(t) d_\alpha t. \quad (20)$$

III. MAIN RESULTS

For $a < x < b$, we are looking at the conformable extension through account of the Sturm-Liouville eigenvalue problem having modified Coulomb potential

$$-T_\alpha^a T_\alpha^a y + \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y = \alpha^2 \lambda y. \quad (21)$$

where $\frac{y(x)}{x^\alpha} \in C^{2\alpha}[0, \pi]$. We analyze (22) with boundary conditions

$$\begin{aligned} c_1 y(0) + c_2 y'(0) &= 0, & c_1^2 + c_2^2 &> 0, \\ r_1 y(\pi) + r_2 y'(\pi) &= 0, & r_1^2 + r_2^2 &> 0. \end{aligned} \quad (22)$$

If $T_\alpha^a T_\alpha^a y$ is continuous on $[a, b]$ then we conclude that y is 2α -continuously differentiable. Also, $y \in C^{2\alpha}[a, b]$ where $y \in C^1[a, b]$ and be 2α -continuously differentiable on $[a, b]$.

Suppose that L be a linear operator described on certain elements such that

$$L(y, \alpha) = -T_\alpha^a T_\alpha^a y + \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y, \quad (23)$$

then we can write (22) as

$$L(y, \alpha) = \alpha^2 \lambda y. \quad (24)$$

In this process, we generalize the easy outcome of a well-known Lagrange identity.

Theorem 3.1. Let y_1, y_2 be 2α -continuously differentiable functions on the interval $[0, \lambda]$, so that the following equation maintain true

$$\int_0^{\pi} (y_2 L(y_1, \alpha) - y_1 L(y_2, \alpha)) d_{\alpha}(x) = (y_2 T_{\alpha}^{\alpha} y_1 - y_1 T_{\alpha}^{\alpha} y_2) |_0^{\pi}. \quad (25)$$

This theorem is said to be the conformable Lagrange identity.

Proof. From (22), we see that

$$\begin{aligned} y_2 L(y_1, \alpha) - y_1 L(y_2, \alpha) &= -y_2 T_{\alpha}^{\alpha} T_{\alpha}^{\alpha} y_1 + \alpha^2 \left(\frac{A}{x^{\alpha}} + q(x) \right) y_1 y_2 \\ &\quad + y_1 T_{\alpha}^{\alpha} T_{\alpha}^{\alpha} y_2 - \alpha^2 \left(\frac{A}{x^{\alpha}} + q(x) \right) y_1 y_2 \\ &= y_1 T_{\alpha}^{\alpha} T_{\alpha}^{\alpha} y_2 - y_2 T_{\alpha}^{\alpha} T_{\alpha}^{\alpha} y_1 \end{aligned} \quad (26)$$

by using conformable integration with order α of (27) and using conformable integration by parts from Theorem 3.1, we obtain

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} (y_2 L(y_1, \alpha) - y_1 L(y_2, \alpha)) d_{\alpha}(x) &= \int_0^{\pi} y_1 T_{\alpha}^{\alpha} T_{\alpha}^{\alpha} y_2 d_{\alpha}(x) - \int_0^{\pi} y_2 T_{\alpha}^{\alpha} T_{\alpha}^{\alpha} y_1 d_{\alpha}(x) \\ &= y_1 T_{\alpha}^{\alpha} y_2 |_0^{\pi} - \int_0^{\pi} T_{\alpha}^{\alpha} y_1 T_{\alpha}^{\alpha} y_2 d_{\alpha}(x) \\ &\quad - y_2 T_{\alpha}^{\alpha} y_1 |_0^{\pi} + \int_0^{\pi} T_{\alpha}^{\alpha} y_1 T_{\alpha}^{\alpha} y_2 d_{\alpha}(x) \\ &= (y_1 T_{\alpha}^{\alpha} y_2 - y_2 T_{\alpha}^{\alpha} y_1) |_0^{\pi}. \end{aligned} \quad (27)$$

Proposition 3.2. Assume that y_1 and y_2 be two given function in $C^1[0, \lambda]$ such that satisfy the boundary conditions (23), then the following holds true

$$(y_2 T_{\alpha}^{\alpha} y_1 - y_1 T_{\alpha}^{\alpha} y_2) |_0^{\pi} = 0. \quad (28)$$

Proof: In (29) we have

$$\begin{aligned} (y_2 T_{\alpha}^{\alpha} y_1 - y_1 T_{\alpha}^{\alpha} y_2) |_0^{\pi} &= y_2(\pi)(T_{\alpha}^{\alpha} y_1)(\pi) - y_1(\pi)(T_{\alpha}^{\alpha} y_2)(\pi) \\ &\quad - (y_2(0)(T_{\alpha}^{\alpha} y_1)(0) + y_1(0)(T_{\alpha}^{\alpha} y_2)(0)). \end{aligned} \quad (29)$$

Since $c_1^2 + c_2^2 > 0$, and $r_1^2 + r_2^2 > 0$, in the beginning, we assume that $c_1 \neq 0$ and $r_1 \neq 0$, without loss of simplification and the proof of other cases going to be gotten similarly. Now in (23), we get

$$y(0) = -\frac{c_2}{c_1}y'(0),$$

$$y(\pi) = -\frac{r_2}{r_1}y'(\pi).$$
(30)

By the above definitions $(T_\alpha^a y_1)(x) = (x - a)^{1-\alpha}y'_1(x)$ and $(T_\alpha^a y_2)(x) = (x - a)^{1-\alpha}y'_2(x)$ because $y_1, y_2 \in C^1[a, b]$. Now by applying that and (29) in equation (28), we get

$$\begin{aligned} & (y_2(\pi)(T_\alpha^a y_1)(\pi) - y_1(\pi)(T_\alpha^a y_2)(\pi)) \\ &= -\frac{r_2}{r_1}y'_2(\pi)(T_\alpha^a y_1)(\pi) + \frac{r_2}{r_1}y'_1(\pi)(T_\alpha^a y_2)(\pi) \\ &= -\frac{r_2}{r_1}(y'_2(\pi)(\pi - a)^{1-\alpha}y'_1(\pi) - y'_1(\pi)(\pi - a)^{1-\alpha}y'_2(\pi)) \\ &= 0. \end{aligned}$$
(31)

Similarly

$$y_2(0)(T_\alpha^a y_1)(0) + y_1(0)(T_\alpha^a y_2)(0) = 0.$$
(32)

Therefore the proof has been demonstrated.

Definition 3.3. [8] Let f and g be two given function then we say f and g are α -orthogonal in relation to the weight function $\mathcal{U}(t) \geq 0$, where

$$\int_0^\pi \mathcal{U}(x) f(x)g(x)d_\alpha(x) = 0.$$
(33)

Theorem 3.4. Both eigenfunctions y_1 and y_2 of the Sturm-Liouville eigenvalue problem (22) – (23) corresponding to different eigenvalues λ_1 and λ_2 respectively are α -orthogonal where $(y_1, y_2) \in L_\alpha^2([0, \pi], \mathbb{R}) \times L_\alpha^2([0, \pi], \mathbb{R})$.

Proof. in (25) we see that

$$L(y_1, \alpha) = \alpha^2 \lambda_1 y_1$$
(34)

$$L(y_2, \alpha) = \alpha^2 \lambda_2 y_2$$
(35)

multiplying (35) by y_2 also, multiplying (36) by y_1 and subtracting both equations, then we receive that

$$(\lambda_1 - \lambda_2)\alpha^2 y_1 y_2 = y_2 L(y_1, \alpha) - y_1 L(y_2, \alpha).$$
(36)

By using the conformable integration with order α and the conformable Lagrange identity theorem, we see that

$$\begin{aligned} (\lambda_1 - \lambda_2)\alpha^2 \int_0^\pi y_1 y_2 d_\alpha(x) &= \int_0^\pi (y_2 L(y_1, \alpha) - y_1 L(y_2, \alpha)) d_\alpha(x) \\ &= [y_2 T_\alpha^\alpha y_1 - y_1 T_\alpha^\alpha y_2] \Big|_0^\pi \\ &= 0, \end{aligned} \tag{37}$$

it is according to Proposition 3.2. In (38) we get $\int_0^\pi y_1 y_2 d_\alpha(x) = 0$ because the eigenvalues λ_1 and λ_2 are distinct and $\alpha^2 \neq 0$, this fulfills the proof.

Theorem 3.5. Eigenvalues of the conformable Sturm-Liouville eigenvalue problem (21) – (23) are real.

Proof. Assume that y be a solution of the conformable Sturm-Liouville eigenvalue problem (21) – (23). By applying the complex conjugate of (21) – (23), then we obtain that

$$\begin{aligned} L(\bar{y}, \alpha) &= -T_\alpha^\alpha T_\alpha^\alpha \bar{y} + \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) \bar{y} \\ &= \alpha^2 \lambda \bar{y}. \end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned} c_1 \bar{y}(0) + c_2 \bar{y}'(0) &= 0, \quad c_1^2 + c_2^2 > 0. \\ r_1 \bar{y}(\pi) + r_2 \bar{y}'(\pi) &= 0, \quad r_1^2 + r_2^2 > 0. \end{aligned} \tag{39}$$

By using comparable measures to the proof of Theorem 3.4 for $y_1 = y, y_2 = \bar{y}, \lambda_1 = \lambda$ and $\lambda_2 = \bar{\lambda}$, we get

$$\begin{aligned} \alpha^2(\lambda - \bar{\lambda}) \int_0^\pi |y(x)|^2 d_\alpha(x) &= \int_0^\pi (\bar{y} L(y, \alpha) - y L(\bar{y}, \alpha)) d_\alpha(x) \\ &= [\bar{y} T_\alpha^\alpha y - y \overline{T_\alpha^\alpha y}] \Big|_0^\pi \\ &= 0 \end{aligned} \tag{40}$$

So, $\int_0^\pi |y(x)|^2 d_\alpha(x) \neq 0$ because $|y(x)|^2$ is positive, since $\alpha^2 > 0$, Then $\lambda - \bar{\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda = \bar{\lambda}$. Hence, the eigenvalues must be real.

Definition 3.6.[7] We assume that $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$ are $(n - 1)$ times α -differentiable functions and $0 < \alpha \leq 1$. So that, we are denoting the conformable Wronskian of that functions by $W_\alpha(y_1, y_2, \dots, y_n)$ and defined as

$$W_\alpha(y_1, y_2, \dots, y_n) = \begin{vmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ T_\alpha^\alpha y_1 & T_\alpha^\alpha y_2 & \dots & T_\alpha^\alpha y_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ (n-1)T_\alpha^\alpha y_1 & (n-1)T_\alpha^\alpha y_2 & \dots & (n-1)T_\alpha^\alpha y_n \end{vmatrix}. \tag{41}$$

Theorem 3.7. Suppose that $y \in C^{2\alpha}[0, \pi]$, then the representation of the solution of the Sturm-Liouville eigenvalue problem having modified Coulomb potential

$$-T_\alpha T_\alpha y + \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y = \alpha^2 \lambda y, \quad (42)$$

With both initial conditions $y(0, \lambda) = 1$ and $T_\alpha^0 y(0, \lambda) = h$ is

$$y(x) = \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + \frac{h}{\alpha\sqrt{\lambda}} \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) \sin(\sqrt{\lambda}(x^\alpha - t^\alpha)) d_\alpha t. \quad (43)$$

Proof. To get a solution of (43) we need to find y_h and y_p .

$$T_\alpha T_\alpha y + \alpha^2 \lambda y = 0 \quad (44)$$

we look for $y = e^{r\frac{x^\alpha}{\alpha}}$, then $T_\alpha^0 y = r e^{r\frac{x^\alpha}{\alpha}}$ and $T_\alpha T_\alpha y = r^2 e^{r\frac{x^\alpha}{\alpha}}$. So, in (45) we get $(r^2 + \alpha^2 \lambda) e^{r\frac{x^\alpha}{\alpha}} = 0 \Rightarrow$. Hence, we obtain that $r_1 = \alpha\sqrt{\lambda}i$ and $r_2 = -\alpha\sqrt{\lambda}i$. So,

$$y_h = c_1 \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + c_2 \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha). \quad (45)$$

Suppose that $y_1 = \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha)$ and $y_2 = \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha)$, then we have

$$y_p = u_1 y_1 + u_2 y_2 \quad (46)$$

$$T_\alpha y_p = T_\alpha u_1 y_1 + u_1 T_\alpha y_1 + T_\alpha u_2 y_2 + u_2 T_\alpha y_2 \quad (47)$$

$$T_\alpha u_1 y_1 + T_\alpha u_2 y_2 = 0 \quad (48)$$

$$T_\alpha T_\alpha y_p = T_\alpha u_1 T_\alpha y_1 + u_1 T_\alpha T_\alpha y_1 + T_\alpha u_2 T_\alpha y_2 + u_2 T_\alpha T_\alpha y_2. \quad (49)$$

By taking (47) and (50) in (43), we get

$$-T_\alpha u_1 T_\alpha y_1 - u_1 T_\alpha T_\alpha y_1 - T_\alpha u_2 T_\alpha y_2 - u_2 T_\alpha T_\alpha y_2 + \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y = \alpha^2 \lambda u_1 y_1 + \alpha^2 \lambda u_2 y_2$$

$$T_\alpha u_1 T_\alpha y_1 + T_\alpha u_2 T_\alpha y_2 + u_1 (T_\alpha T_\alpha y_1 + \alpha^2 \lambda y_1) + u_2 (T_\alpha T_\alpha y_2 + \alpha^2 \lambda y_2) = \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y$$

$$T_\alpha u_1 T_\alpha y_1 + T_\alpha u_2 T_\alpha y_2 = \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y \quad (50)$$

So, by (49) and (51) we receive that

$$T_\alpha u_1 \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + T_\alpha u_2 \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha) = 0 \quad (51)$$

$$-\alpha\sqrt{\lambda}T_\alpha u_1 \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + \alpha\sqrt{\lambda}T_\alpha u_2 \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) = \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y \quad (52)$$

By applying Definition 3.6 to find α -Wronskian of y_1 and y_2 as

$$\begin{aligned} W_\alpha(y_1, y_2) &= y_1 T_\alpha y_2 - y_2 T_\alpha y_1 \\ &= \alpha\sqrt{\lambda} (\cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha))^2 + \alpha\sqrt{\lambda} (\sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha))^2 \\ &= \alpha\sqrt{\lambda} \end{aligned} \quad (53)$$

$$T_\alpha u_1 = \frac{\begin{vmatrix} 0 & \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha) \\ \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y & \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) \end{vmatrix}}{\alpha\sqrt{\lambda}} = -\frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha). \quad (54)$$

$$T_\alpha u_2 = \frac{\begin{vmatrix} \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) & 0 \\ \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha) & \alpha^2 \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y \end{vmatrix}}{\alpha\sqrt{\lambda}} = \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \left(\frac{A}{x^\alpha} + q(x) \right) y \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha). \quad (55)$$

$$u_1 = -\frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) \sin(\sqrt{\lambda}t^\alpha) d_\alpha t. \quad (56)$$

$$u_2 = \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) \cos(\sqrt{\lambda}t^\alpha) d_\alpha t. \quad (57)$$

By taking the value of u_1 and u_2 in (47) we obtain

$$\begin{aligned} y_p &= -\frac{\alpha \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha)}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) \sin(\sqrt{\lambda}t^\alpha) d_\alpha t \\ &\quad + \frac{\alpha \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha)}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) \cos(\sqrt{\lambda}t^\alpha) d_\alpha t \\ &= \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) [\sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha) \cos(\sqrt{\lambda}t^\alpha) - \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) \sin(\sqrt{\lambda}t^\alpha)] d_\alpha t \\ &= \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) \sin(\sqrt{\lambda}(x^\alpha - t^\alpha)) d_\alpha t. \end{aligned} \quad (58)$$

Thus, from (46) and (59) we have

$$y(x) = c_1 \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + c_2 \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) \sin(\sqrt{\lambda}(x^\alpha - t^\alpha)) d_\alpha t. \quad (59)$$

By applying the boundary conditions, we get that $1 = c_1 \cos 0 + c_2 \sin 0 \Rightarrow c_1 = 1$ and $h = -\alpha\sqrt{\lambda}c_1 \sin 0 + \alpha\sqrt{\lambda}c_2 \cos 0 \Rightarrow c_2 = \frac{h}{\alpha\sqrt{\lambda}}$, then in (60), we get

$$y(x) = \cos(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + \frac{h}{\alpha\sqrt{\lambda}} \sin(\sqrt{\lambda}x^\alpha) + \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \int_0^x \left(\frac{A}{t^\alpha} + q(t) \right) y(t) \sin(\sqrt{\lambda}(x^\alpha - t^\alpha)) d_\alpha t. \quad (60)$$

Application 3.8. In [18] for $0 < \alpha \leq 1$ by using the Frobenius method we obtained the solution of modified power series within a regular singular point $x = 0$ of

$$-T_\alpha T_\alpha y + \alpha^2 \frac{1}{x^\alpha} y = 0, \quad (61)$$

as

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_0}{n!(n+1)!} x^{(n+1)\alpha}. \quad (62)$$

Equation (61) is the first solution of conformable Sturm-Liouville eigenvalue problem having modified Coulomb potential in the homogeneous case for A

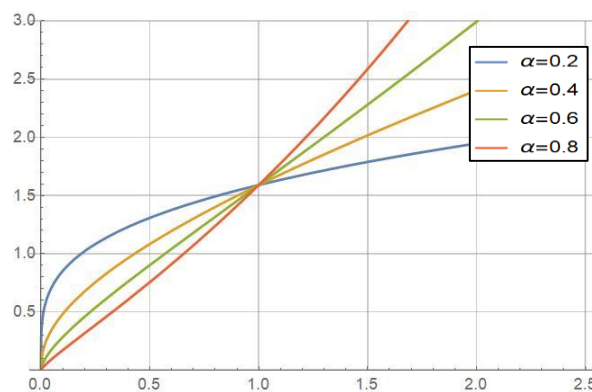


Figure 1. The solution of the equation (62) when in(63) $c_0 = 1$.

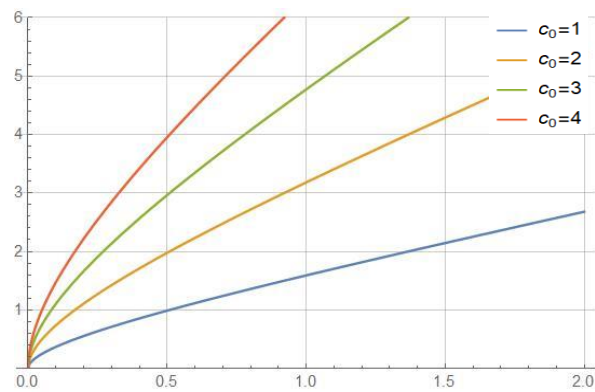


Figure 2. The solution of the equation (62) when in (63) $\alpha = 0.5$.

Furthermore, the first solution to

$$T_\alpha T_\alpha y - \alpha^2 \frac{1}{x^\alpha} y = \alpha^2 \lambda y, \quad (63)$$

where $0 < \alpha \leq 1$ is

$$y(x) = c_0 \left(x^\alpha + \frac{1}{2} x^{2\alpha} + \frac{(2\lambda + 1)}{2.2.3} x^{3\alpha} + \frac{(8\lambda + 1)}{2.2.3.3.4} x^{4\alpha} + \frac{24\lambda^2 + (20\lambda + 1)}{2.2.3.3.4.4.5} x^{5\alpha} + \dots \right). \quad (64)$$

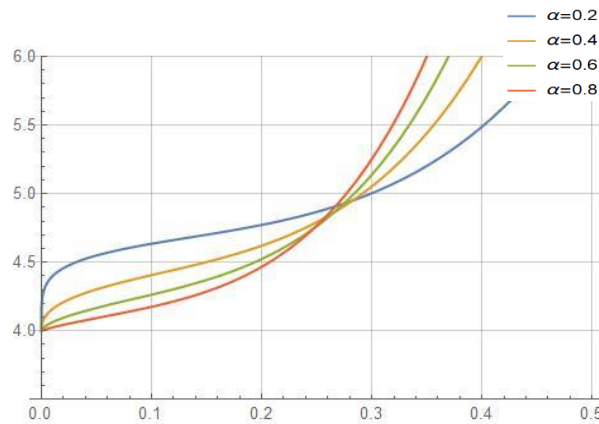


Figure 3. The solution of the equation (64) when in(65) $\lambda = 1, c_0 = 1$.

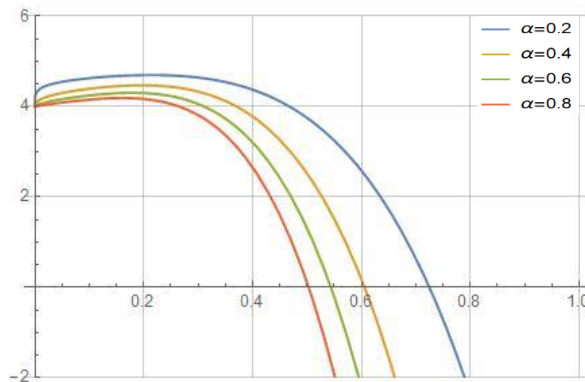


Figure 4. The solution of the equation (64) when in (65) $c_0 = 1, \lambda = -1$.

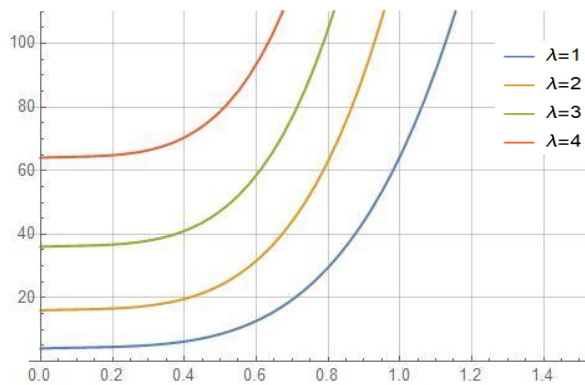


Figure 5. The solution of the equation (64) when in (65) $c_0 = 1, \alpha = 0.5$.

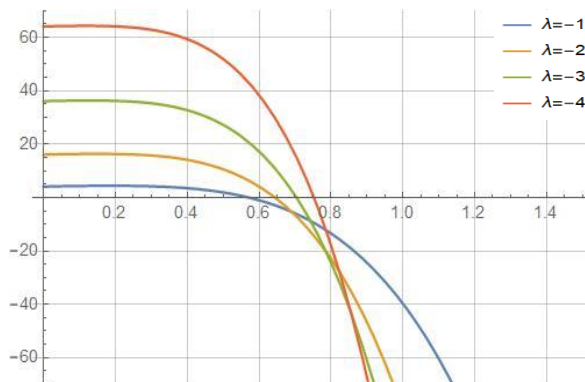


Figure 6. The solution of the equation (64) when in (65) $\alpha = 0.5, c_0 = 1$.

IV. CONCLUSION

The conformable extension through the study of the Sturm-Liouville eigenvalue problem having modified Coulomb potential is recognized. We proved the conformable Lagrange identity theorem by using conformable integration by parts. Defined orthogonality of two functions and using this definition can show that the eigenfunctions of the Sturm-Liouville eigenvalue problem corresponding to different eigenvalues are α -orthogonal. By applying the complex conjugate of the problem (21) – (23) we showed that the eigenvalues of this problem are real. Furthermore, by applying the definition of the conformable Wronskian function discovered

the representation of the solution to the Sturm-Liouville eigenvalue problem having modified Coulomb potential. We have known that the outcomes of the solution of conformable Sturm-Liouville eigenvalue problem having modified Coulomb potential in the homogeneous case are different with distinct order of derivative, see Fig. 1. Also, the series solutions are increasing on different positive scalar multiplication with order $\alpha = 0.5$ and they are different, can see Fig. 2. The solution of a non-homogeneous case approach to negative infinite number for negative eigenvalues λ , see Fig. 4. and Fig. 6.

REFERENCES

- [1] Wu, G. C., & Baleanu, D. (2013). New applications of the variational iteration method-From differential equations to q-Fractional difference equations, *Advances in Difference Equations* 2013, 1–16.
- [2] Bas, E., & Metin, F. (2013). Fractional singular Sturm-Liouville operator for Coulomb potential, *Advances in Difference Equations* 2013, 300.
- [3] Baleanu, D., & Mustafa, O. G. (2011). On the existence interval for the initial value problem of a fractional differential equation, *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics* 40, 581–587.
- [4] Cabrera, I. J., Harjani, J., & Sadarangani, K. B. (2012). Existence and uniqueness of positive solutions for a singular fractional three-point boundary value problem, *Abstract and Applied Analysis* 2012.
- [5] Unal, E., Gokdogan, A., & Celik, E. (2017). Solutions around a regular α singular point of a sequential conformable fractional differential equation, *Kuwait Journal of Science* 44, 9–16.
- [6] Khalil, R., & Abu Hammad, M. (2014). Legendre fractional differential equation and Legendre fractional polynomials, *International Journal of Applied Mathematical Research* 3, 214–219.
- [7] Gökdoğan, A., Ünal, E., & Çelik, E. (2016). Existence and uniqueness theorems for sequential linear conformable fractional differential equations, *Miskolc Mathematical Notes* 17, 267–279.
- [8] Al-Refai, M., & Abdeljawad, T. (2017). Fundamental results of conformable Sturm-Liouville eigenvalue problems, *Complexity* 2017.
- [9] Bas, E., & Acay, B. (2020). The direct spectral problem via local derivative including truncated Mittag-Leffler function, *Applied Mathematics and Computation* 367.
- [10] Bas, E., Ozarslan, R., & Baleanu, D. (2018). Sturm-Liouville difference equations having Bessel and hydrogen atom potential type, *Open Physics* 16, 801–809.
- [11] Gökdoğan, A., Ünal, E., & Çelik, E. (2015). Conformable fractional Bessel equation and Bessel functions, arXiv preprint arXiv:1506.07382.
- [12] Baleanu, D., Mustafa, O. G., & Agarwal, R. P. (2011). Asymptotic integration of $(1 + \alpha)$ -order fractional differential equations, *Computers and Mathematics with Applications* 62, 1492–1500.
- [13] Panakhov, E. S., & Sat, M. (2013). Reconstruction of potential function for sturm-liouville operator with coulomb potential, *Boundary Value Problems* 2013, 1–9.
- [14] Grace, S. R., Agarwal, R. P., Wong, P. J. Y., & Zafer, A. (2012). On the oscillation of fractional differential equations, *Fractional Calculus and Applied Analysis* 15, 222–231.
- [15] Abdeljawad, T. (Elsevier, 2015). On conformable fractional calculus, in *Journal of computational and Applied Mathematics* vol. 279 57–66.
- [16] Khalil, R., Al Horani, M., Yousef, A., & Sababheh, M. (2014). A new definition of fractional derivative, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 264, 65–70.

- [17] Wang, Y., Zhou, J., & Li, Y. (2016). Fractional Sobolev's spaces on time scales via conformable fractional calculus and their application to a fractional differential equation on time scales, *Advances in Mathematical Physics* 2016.
- [18] Bas, E., & Najemdeen, I. (2019) "Singular eigenvalue problem with modified Frobenius method" *Cmec2019 Conf. Proceed*, No. 84, p. 717-726.

Araştırma Makalesi - Research Article

Makine Seçimi Probleminin Entropi Ağırlıklı TOPSIS Yöntemi İle Değerlendirilmesi: Bir Doğal Taş İşletmesi Örneği

Gözde Koca^{1*}, Özüm Eğilmez²

Geliş / Received: 25/04/2020

Revize / Revised: 22/06/2020

Kabul / Accepted: 05/07/2020

ÖZ

Sürekli yeniliğin simgesi olan teknolojik gelişmelerin bir sonucu olan ar-ge faaliyetleri makine tasarımına ve özelliklerine yansımaktadır. İşletmelerce önemli bir karar olan yeni teknoloji kullanımı bağlamında, bu çalışmada doğal taş(mermer) sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede mermer işleme makinesi seçimi problemi fayda ve maliyet kriterleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Değerlendirme 14 farklı makine markası ve 5 farklı kriter (motor gücü, devir hızı, Z eksen, maksimum testere çapı ve fiyat) bağlamında yapılmıştır. Kriterleri değerlendirmede Entropi yöntemi, alternatif makineleri değerlendirmede de TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Sonuçta yapılan objektif değerlendirmede en önemli kriterin “maksimum testere çapı (mm)” olduğu ve alternatif mermer işleme makineleri içinden en iyi alternatifin Alternatif 11 (A11) olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar dâhilinde bu çalışma, uygulayıcıların sadece makine seçiminde değil, diğer tüm kaynak dağıtım problemlerinde yararlanacakları bir referans olma özelliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler- Makine Seçimi, Stratejik Yönetim, Entropi, TOPSIS, Çok Kriterli Karar Verme

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: gozde.koca@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6847-6812>)

İşletme Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye

²İletişim: ozum.egilmez@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5251-5629>)

İşletme Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye

Evaluation of Machine Selection Problem by Entropy Weighted TOPSIS Method: An Example of A Natural Stone Company

ABSTRACT

R&D activities, which are the result of technological developments, the symbol of continuous innovation, reflect on machine design and features. In the context of the use of new technology, which is an important decision by the enterprises, the problem of choosing a marble processing machine in an enterprise operating in the natural stone (marble) sector was evaluated by considering the benefit and cost criteria. The evaluation was made in the context of 14 different machine brands and 5 different criteria (motor power, rotational speed, Z axis, maximum saw diameter, and price). Entropy method was used to evaluate the criteria, and TOPSIS method was used to evaluate alternative machines. In the final objective evaluation, it was determined that the most important criteria were “maximum saw diameter (mm)” and Alternative 11 (A11) was the best alternative among alternative marble processing machines. Within the methods used and the results obtained, this study is a reference that practitioners will benefit not only in machine selection but also in all other resource distribution problems.

Keywords- Machine Selection, Strategic Management, Entropy, TOPSIS, Multi Criteria Decision Making

I. GİRİŞ

Türkiye doğal taş (mermer ve granit sektörlerini kapsayan) sektöründe Çin ve İtalya ile birlikte öncü bir ülke konumundadır. Doğal taş sektörü, rezerv temelli olarak ihracat ağırlıklı yaşamını sürdürmektedir. Bununla beraber, doğal taş kullanımının ihtiyaca bağlı olarak artması, sektörün canlılığını devamlı olarak sürdürebilmesini sağlamaktadır. Yeni çevre anlayışı ve sürdürülebilirlik, doğal taş sektöründeki faaliyetleri de değiştirmektedir. Çeşitli işleme ve birleştirme teknikleri geliştirilerek ve hem çevreye verilen olası zararı azaltma, hem de rezervlerin işlerlik süresinin uzatılması yoluna gidilmiştir.

Gelişen yeni teknolojiler, öncelikle üretimde kullanılan makinelerde hem nitelik hem de nicelik anlamında gelişmelere neden olmuştur. Teknolojinin sunduğu yenilikler genel anlamda fırsatlar barındırır da, belirsizliğin bir yansıması olduğu için işletmelerde tehdit olarak görülebilmektedir. Hem stratejik yönetsel bakış hem de belirsizlik durumlarında en doğru kararı verebilmek adına, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımları tam da burada devreye girmektedir. Rekabet avantajını sürdürmek veya hızla büyüyen ve gelişen doğal taş sektöründe daha fazla yer almak adına, kimi zaman öncü, kimi zaman analizci ya da tepki gösterici strateji uygulamaları ile işletmeler bir takım faaliyetlerde bulunmaktadırlar. Seçilen strateji her ne olursa olsun, bir kararı ifade etmektedir. Karar vermede ise, alternatifleri doğru belirlemek ve doğru alternatifi seçmek önem arz etmektedir. ÇKKV yaklaşımları, karar vericileri çeşitli değişken ve parametreler karşısında çözüm üretmeyi amaçlar. Karar vericileri, mevcut karar durumunu daha belirli bir yapı formunda hareket edebilecekleri nesnel bir bakış açısına sürükler. Bu şekilde, karar vericinin bir takım kişisel bilgi, tecrübe ve beceriye sahip olma zorunluluğu ortadan kalkmış olur. Bu sayede yönetsel kararlar daha merkezkaç bir yapı oluşturularak verilebilir. Karar verici yetkisine sahip her birey, ÇKKV yaklaşımları ile çoklu sayıda alternatifi bir arada değerlendirebilir. Böylesi bir yapı, karar alma, esneklik ve sürdürülebilirlik bağlamında işletmeler için arzu edilen bir yapıdır.

Bu çalışmada, doğal taş sektöründe faaliyet gösteren ve sektörel rekabet avantajına sahip olan bir işletmede *makine seçimi* araştırılmıştır. Problem seçiminin makine seçimi olarak seçilmesinin nedeni, doğru makine ile uzun süreli etkin ve verimli bir şekilde üretim yapabilmektir, bu da kaynakların doğru dağıtılmasında önem arz etmektedir. Doğal taş sektöründe- özelliğine bağlı değişimle birlikte- makine seçimi büyük bir yatırım anlamına gelmekte, bu da karar vericiler için ekonomik anlamda baskı unsuru olmaktadır.

Belirtilen nedenler doğrultusunda, karar alma işletmeler için çok daha nesnel ve akılcı bir takım nedenlerle işleyen bir mekanizma özelliği taşımalıdır. Bu mekanizma, hem her işletmeye özgü bir takım misyon, vizyon ve stratejik bakış açısını içeren, hem de bağlı bulunan çevresel etkiler bağlamında değerlendirilebildiği takdirde işlevsel olabilecektir. Bu nedenle, en uygun makinenin seçilebilmesi için Entropi ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak bir çözüm yapılmıştır. Entropi yöntemi ile karar alıcıların sezgisel yargılarından ve tutumlarından bağımsız bir şekilde, makine seçimi için belirlenen karar kriterlerinin ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından TOPSIS yöntemi ile karar kriterlerinin ağırlıkları hesaba katılarak, alternatif makineler önem değerlerine göre sıralandırılmıştır. Seçilen analiz yöntemleri aynı zamanda kullanıcı dostu olarak adlandırılabilir. Entropi ve TOPSIS yöntemlerinin bu anlamda öne çıkan avantajı, uygulanması ve yorumlanmasının görece kolay olmasıdır. Her iki yöntem için herhangi bir program veya yazılım kullanımı söz konusu olmayıp, Excel programı ile çözülebilmektedir. Bu ise, sadece doğal taş sektörü için değil, kaynak aktarım problemlerinde söz konusu olan herhangi bir olgu (tedarikçi seçimi, araç seçimi, kullanılacak teknoloji vb.) için herhangi bir sektördeki başka karar vericiler tarafından da uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Bu sayede kaynakların rasyonel kullanıldığı ve alınan kararların sorumluluğunun paylaşıldığı bir yapı ortaya çıkabilecektir.

Bu çalışma konunun genel çerçevesinin değerlendirildiği giriş bölümü ile birlikte altı bölümden oluşmaktadır. ÇKKV yöntemlerinin ve ilgili makalelerde yer alan problemlerin örneklendirildiği literatür taraması, Entropi, TOPSIS ve uygulama bölümüne ek, son olarak sonuç bölümü yer almaktadır.

II. LİTERATÜR TARAMASI

Gerek bireyler olsun, gerekse de işletmeler olsun hayatlarının her döneminde çok boyutlu problemler için karar almak zorundadırlar. Çoğu zaman, birbirleriyle çatışan birçok kriterin ve amaçların gerçekleşmesiyle karşı karşıya kalmaktadırlar. Çok kriterli karar verme teknikleri, bu durumda “en iyi/uygun” çözüme ulaşmada

yardımcı olmaktadır. Karar vericiler karar alma noktasında, bu tür problemlerin üstesinden gelmede çok kriterli karar verme tekniklerinden faydalanmakta yarar sağlamaktadır.

İşletmelerin karar vermesi gereken en önemli konularının arasında makine seçim problemleri de yer almaktadır. Literatürde de ÇKKV yöntemleri kullanılarak yapılan makine seçimi problemleri aşağıda Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. ÇKKV yöntemleri kullanılarak makine seçimine ilişkin çalışmalar

Konu	Yöntem/Yöntemler	Referanslar
Tekstil işletmesinde makine seçimi	EDAS; Bulanık AHS; Entropi-ROV ve CRITIC-ROV; Bulanık VIKOR	[1, 2, 3, 4]
Gemi inşada ana makine seçimi	AHP, TOPSIS ve PROMETHEE; TOPSIS, MOORA, VIKOR; AHP-SMART	[5, 6, 7]
Makine seçimini etkileyen kriterlerin değerlendirilmesi	Bulanık DEMATEL	[8]
Mermer kesim makinesi seçimi	Bulanık DEMATEL-Bulanık VIKOR; KEMIRA-M VE COPRAS	[9, 10]
CNC makinesi seçimi	Bulanık AHS-Bulanık TOPSIS; Bulanık VIKOR	[11,12]
Kablo üretiminde makine seçimi	Bulanık DEMATEL-Bulanık PROMETHEE	[13]
Taşımacılıkta çekici araç seçimi	AHP, Entropi ve TOPSIS	[14]
Tarım makinesi seçimi	AHP ile Bütünleşik Gri İlişkisel Analiz	[15]
Esnek üretim sistemleri seçimi	AHS-Bulanık PROMETHEE	[16]
Yapı makinesi seçimi	VIKOR	[17]
Alışılmamış imalat yöntemlerinin seçimi	Bulanık AHP, Bulanık TOPSIS	[18]
Transpalet seçimi	AHP, EDAS	[19]
Paketleme makinesi seçimi	Sezgisel Bulanık TOPSIS	[20]
Çay kurutucusu seçimi	Bulanık SMART ve Bulanık Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım	[21]
Pres makinesi seçimi	DELPHI, Bulanık AHS ve Bulanık PROMETHEE	[22]

Literatürde Entropi-TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanıldığı çalışmalar ise aşağıda Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Entropi-TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanılmasına ilişkin çalışmalar

Konu	Referanslar
BİST’te işlem gören firmaların performansının incelenmesi	[23, 24, 25, 26, 27]
Futbol takımlarının finansal ve sportif etkinliklerinin analiz edilmesi	[28]
Enerji sektöründe kurumsal sürdürülebilirlik performansının ölçümü.	[29]
AB ülkelerinin Ar-Ge performanslarının ölçülmesi	[30]
Organize sanayi bölgelerinin yatırım ortamının değerlendirilmesi	[31]
Endüstri İşletmelerinde AR-GE Projelerini Öncelik Sıralaması	[32]
Havaalanlarının hizmet kalitesi performansları değerlendirilmesi	[33]
Akademik personelin duygusal performanslarının ölçülmesi	[34]
Yeşil Tedarikçi seçimi	[35]
Yeşil teknoloji yeniliklerinin ekonomik ve ekolojik değerlendirilmesi	[36]
Elektrikli şarj istasyonu seçimi	[37]
Yeraltı suları kalitesi sıralaması	[38]
Demir-Çelik sanayinde simbiyotik teknoloji değerlendirmesi	[39]
Turizm destinasyon değerlendirmesi	[40]

Tablo 1.'de görüldüğü üzere ÇKKV yöntemleri çeşitli sektörlerde makine seçimleri problemlerinde kullanılmıştır. Tablo 2.'de ise, Entropi ve TOPSIS yöntemlerinin çok çeşitli alanlarda kullanıldığı görülmektedir. Bu alanlar Avrupa Birliği'nin AR-GE performans ölçümünden, tedarikçi seçimine; kullanılan teknoloji değerlendirmesinden, organizasyonel ve sektörel etkinlik ölçümüne kadar farklılık göstermektedir.

III. ENTROPİ YÖNTEMİ

Literatürde Entropi kavramı ilk kez 1865 yılında Rudolph Clausius tarafından bir sistemde meydana gelen düzensizliğin ve belirsizliğin bir ölçüsü olarak ifade edilmiştir [40]. Günümüzde fizik, matematik ve mühendislik bilimlerinde yaygın olarak karşılaşılan Entropi kavramı Shannon'ın (1948) enformasyon teorisine uyarlanmıştır. Mevcut verinin elde edildiği faydalı bilginin miktarını ölçmede kullanılan Entropi yöntemi objektif kararların alınmasında kullanılmaktadır [12]. Entropi yönteminin aşamaları aşağıdaki gibi açıklanabilir [41, 42].

a_i : alternatif i ; $i=1,2,3,\dots,m$

c_j : kriter j ; $j=1,2,3,\dots,n$

x_{ij} : alternatif i 'nin j kriteri açısından performans değeri

D: karar matrisi

Karar matrisi Eşitlik 1'deki gibi oluşturulabilir.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Karar matrisinde birbirinden farklı indeks boyutlarının eşölçülemezlik üzerindeki etkilerini yok etmek amacıyla indeksler çeşitli yöntemlerle standartlaştırılabilmektedir. Fayda ve maliyet indekslerine göre kriterler Eşitlik (2) ve Eşitlik (3) yardımıyla standartlaştırılır.

$$r_{ij} = x_{ij} / \max_{ij} (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n) \quad (2)$$

$$r_{ij} = \min_{ij} / x_{ij} (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n) \quad (3)$$

p_{ij} : alternatif i 'nin j kriteri açısından normalize edilmiş performans değeri

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \forall i, j \quad (4)$$

ND: Normalize edilmiş karar matrisi

Normalize edilmiş performans değerleri Eşitlik 5'deki gibi hesaplanabilir.

$$ND = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

E_j = kriter j için entropi değeri; $j=1,2,3,\dots,n$

k:sabit

Entropi değerleri Eşitlik 6'daki gibi hesaplanabilir.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m [(p_{ij})(\ln(p_{ij}))] \quad \forall j \quad (6)$$

Yöntemdeki sabit değer Eşitlik 7'deki gibi hesaplanabilir.

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (7)$$

d_j : kriter i için belirsizlik derecesi; $j=1,2,3,\dots,n$

Belirsizlik derecesi Eşitlik 8'deki gibi hesaplanabilir.

$$d_j = 1 - E_j \quad (8)$$

W_j : kriter j için ağırlık değeri; $j=1,2,3,\dots,n$

Ağırlık değerleri Eşitlik 9'daki gibi hesaplanabilir.

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (9)$$

IV. TOPSIS YÖNTEMİ

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemlerinde, alternatifler, belirli kriterler altında analiz edilerek, performans sıralaması yapılmaktadır. Literatürde kullanılan ÇKKV metotlarından birisi olan, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to İdeal Solution) yöntemi 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından ortaya konulmuştur [43]. Bu yöntem, pozitif-ideal çözüme en yakın ve negatif-ideal çözüme en uzak alternatiflerin performans sıralamasını yapmaktadır. TOPSIS işleminde m alternatifleri, n kriterleri değerlendiren aşamaları aşağıda yer almaktadır:

Karar Matrisi (A) Eşitlik 10'daki gibi oluşturulur.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Normalleştirilmiş Karar Matrisinin (R) Eşitlik 11 kullanılarak elde edilir. Bu adımda, verileri ölçekten normalleştirmek için tüm sütun değerleri kareli toplamlarına bölünür.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

Normalleştirilmiş karar matrisi R Eşitlik 12'deki gibi elde edilir

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Normalize Matrisin Ağırlıklandırılması için R matrisinin her sütunundaki elemanları ilgili w_j değeri ile çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize matris (V matrisi) Eşitlik 13 gibi elde edilir.

$$V = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

İdeal ve ideal olmayan çözümleri aşağıdaki Eşitlik (14) ve Eşitlik (15) yoluyla elde edilmektedir:

$$A^* = \left\{ \max_j v_{ij} | j \in J, (\min_j v_{ij} | j \in J) \right\} \quad (14)$$

$$A^- = \left\{ \min_j v_{ij} | j \in J, (\max_j v_{ij} | j \in J) \right\} \quad (15)$$

İdeal ve İdeal Olmayan Çözümlere Uzaklıkların Hesaplanmasında Öklid metriği kullanılmaktadır. Alternatiflerin ideal çözümden ve negatif ideal çözümden uzaklaşma değerleri sırasıyla; ideal uzaklık (S_i^*) ve ideal olmayan uzaklık (S_i^-) olarak Eşitlik 16 ve Eşitlik 17'deki gibi verilmektedir.

İdeal uzaklık:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

İdeal olmayan uzaklık:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

İdeal Çözüme Göreceli Yakınlık, ideal ve ideal olmayan çözümlere olan uzaklıklardan Eşitlik 18'de belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (18)$$

C_i^* değeri $0 \leq C_i^* \leq 1$ değer almaktadır. $C_i^*=1$ ilgili alternatifin ideal alternatife eşit, $C_i^* =0$ ise ideal olmayan çözüme eşit olduğunu göstermektedir.

V. UYGULAMA

Çalışma kapsamında mermer üretimi yapan bir imalat işletmesi için mermer işleme makinesi seçimi yapılacaktır. Çalışma sonucuna göre işletmeye alınması düşünülen mermer işleme makinesi, mermerlerin kesimi, konturlanması, profilendirilmesi ve şekillendirilmesi gibi işlemler için kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında öncelikle işletme için en uygun mermer işleme makinesinin seçilebilmesi amacıyla satın alma kararı üzerinde etkili olduğu düşünülen kriterler işletme sahibi görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Bu kriterler motor gücü, devir hızı, Z eksen, maksimum testere çapı ve fiyattır. Bu kriterler açısından işletme için uygun olabileceği düşünülen farklı marka ve/veya modelde alternatif on dört adet mermer işleme makinesinin değerlendirilmesine karar verilmiştir. Alternatif makinelerin belirlenen kriterler açısından özellikleri ve karar kriterlerinin amaçları Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. Alternatifleri ve Kriterleri içeren karar matrisi

Alternatifler	Motor Gücü (kW)	Devir hızı (dev/dk)	Z Eksen (mm)	Maksimum testere çapı (mm)	Fiyat (€)
A1	13	5000	320	600	106.400
A2	26,5	6000	700	800	161.030
A3	13,5	15000	420	250	130.500
A4	13,5	15000	420	250	140.000
A5	13,5	15000	600	250	152.000
A6	13,5	15000	900	250	157.000
A7	13,5	9000	580	625	158.000
A8	31	7500	1000	900	176.000
A9	13	4500	400	625	114.285
A10	23,5	8000	700	825	205.135
A11	32	8000	1000	1000	214.398
A12	20	12000	850	625	204.000
A13	20	8000	700	700	172.000
A14	20	8000	900	900	175.000
Amaç	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet

İlk olarak karar matrisinin fayda ve maliyet kriterine göre normalizasyon işlemi Eşitlik (2) ve Eşitlik (3) yardımıyla yapılmıştır (Tablo 4). Daha sonra Eşitlik (4)'te verildiği gibi her bir ilgili kriter değerinin toplamı, ilgili alternatifin kriter değerine bölünerek karar matrisi normalize edilmiştir (Tablo 5).

Tablo 4. Fayda ve Maliyet Kriterlerinin Hesaplanması

Alternatifler	Motor Gücü (kW)	Devir hızı (dev/dk)	Z Eksenini (mm)	Maksimum testere çapı (mm)	Fiyat (€)
A1	0,4063	0,3333	0,3200	0,6000	1,0000
A2	0,8281	0,4000	0,7000	0,8000	0,6607
A3	0,4219	1,0000	0,4200	0,2500	0,8153
A4	0,4219	1,0000	0,4200	0,2500	0,7600
A5	0,4219	1,0000	0,6000	0,2500	0,7000
A6	0,4219	1,0000	0,9000	0,2500	0,6777
A7	0,4219	0,6000	0,5800	0,6250	0,6734
A8	0,9688	0,5000	1,0000	0,9000	0,6045
A9	0,4063	0,3000	0,4000	0,6250	0,9310
A10	0,7344	0,5333	0,7000	0,8250	0,5187
A11	1,0000	0,5333	1,0000	1,0000	0,4963
A12	0,6250	0,8000	0,8500	0,6250	0,5216
A13	0,6250	0,5333	0,7000	0,7000	0,6186
A14	0,6250	0,5333	0,9000	0,9000	0,6080
Amaç	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet

Tablo 5. Normalize Edilmiş Karar Matrisi (P_{ij} Matrisi)

Alternatifler	Motor Gücü (kW)	Devir hızı (dev/dk)	Z Eksenini (mm)	Maksimum testere çapı (mm)	Fiyat (€)
A1	0,0488	0,0368	0,0337	0,0698	0,1043
A2	0,0994	0,0441	0,0738	0,0930	0,0689
A3	0,0507	0,1103	0,0443	0,0291	0,0851
A4	0,0507	0,1103	0,0443	0,0291	0,0793
A5	0,0507	0,1103	0,0632	0,0291	0,0730
A6	0,0507	0,1103	0,0948	0,0291	0,0707
A7	0,0507	0,0662	0,0611	0,0727	0,0703
A8	0,1163	0,0551	0,1054	0,1047	0,0631
A9	0,0488	0,0331	0,0421	0,0727	0,0971
A10	0,0882	0,0588	0,0738	0,0959	0,0541
A11	0,1201	0,0588	0,1054	0,1163	0,0518
A12	0,0750	0,0882	0,0896	0,0727	0,0544
A13	0,0750	0,0588	0,0738	0,0814	0,0645
A14	0,0750	0,0588	0,0948	0,1047	0,0634
Amaç	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet

Entropi (E_j) Değerinin ve K Değerinin Hesaplanmasında Tablo 6'daki her bir kriter değerinin (P_{ij}), logaritma değeri alınmış ($lnij$), alınan bu logaritma değerleriyle kriter değerleri çarpılmaktadır.

Tablo 6. $P_{ij} \times \ln_{ij}$ Değerinin Hesaplanması

Alternatifler	Motor Gücü (kW)	Devir hızı (dev/dk)	Z Ekseni (mm)	Maksimum testere çapı (mm)	Fiyat (€)
A1	-0,1473	-0,1214	-0,1143	-0,1858	-0,2358
A2	-0,2295	-0,1377	-0,1923	-0,2209	-0,1844
A3	-0,1511	-0,2432	-0,1380	-0,1029	-0,2096
A4	-0,1511	-0,2432	-0,1380	-0,1029	-0,2010
A5	-0,1511	-0,2432	-0,1746	-0,1029	-0,1911
A6	-0,1511	-0,2432	-0,2234	-0,1029	-0,1873
A7	-0,1511	-0,1797	-0,1708	-0,1905	-0,1866
A8	-0,2503	-0,1598	-0,2371	-0,2362	-0,1743
A9	-0,1473	-0,1128	-0,1335	-0,1905	-0,2265
A10	-0,2141	-0,1667	-0,1923	-0,2249	-0,1578
A11	-0,2545	-0,1667	-0,2371	-0,2502	-0,1533
A12	-0,1943	-0,2142	-0,2161	-0,1905	-0,1584
A13	-0,1943	-0,1667	-0,1923	-0,2042	-0,1769
A14	-0,1943	-0,1667	-0,2234	-0,2362	-0,1749
Toplam	-2,5816	-2,5649	-2,5831	-2,5414	-2,6178

Bir sonraki aşamada Tablo 7’te bulunan E_j değeri Eşitlik (6), d_j değeri Eşitlik (8) ve w_j değeri Eşitlik (9) yardımıyla hesaplanmıştır. $K=1/\ln.n$, sabit bir sayı olmak üzere $0 \leq e_j \leq 1$ olmasını sağlar. Bu çalışmada, $n=14$ olduğundan $K=1/\ln 14=0,3789$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7. Entropi Değerinin Hesaplanması

Alternatifler	Motor Gücü (kW)	Devir hızı (dev/dk)	Z Ekseni (mm)	Maksimum testere çapı (mm)	Fiyat (€)
E_j	0,978229031	0,97189381	0,9788055	0,962982355	0,991926763
d_j	0,021770969	0,02810619	0,0211945	0,037017645	0,008073237
w_j	0,187418129	0,24195565	0,1824557	0,318671062	0,069499483

Entropi yöntemi sonucunda elde edilmiş kriter ağırlıklarına bakıldığında, en önemli kriterin maksimum testere çapı olduğu belirlenmiştir. Sonrasında kriter ağırlıkları sırasıyla devir hızı, motor gücü, z ekseni ve fiyat olarak sıralanmıştır.

Bu aşamadan sonra alternatifleri değerlendirmek için TOPSİS yöntemi uygulanmıştır. Tablo 8’de Eşitlik (11) yardımıyla elde edilen normalize karar matrisi verilmiştir.

Tablo 8. Normalize edilmiş karar matrisi

Alternatifler	Motor Gücü (kW)	Devir hızı (dev/dk)	Z Ekseni (mm)	Maksimum testere çapı (mm)	Fiyat (€)
A1	0,1724	0,1283	0,1199	0,2407	0,1725
A2	0,3513	0,1540	0,2623	0,3210	0,2611
A3	0,1790	0,3849	0,1574	0,1003	0,2116
A4	0,1790	0,3849	0,1574	0,1003	0,2270
A5	0,1790	0,3849	0,2248	0,1003	0,2464
A6	0,1790	0,3849	0,3372	0,1003	0,2545
A7	0,1790	0,2310	0,2173	0,2508	0,2561
A8	0,4110	0,1925	0,3747	0,3611	0,2853
A9	0,1724	0,1155	0,1499	0,2508	0,1853
A10	0,3116	0,2053	0,2623	0,3310	0,3326
A11	0,4243	0,2053	0,3747	0,4012	0,3476
A12	0,2652	0,3079	0,3185	0,2508	0,3307
A13	0,2652	0,2053	0,2623	0,2808	0,2788
A14	0,2652	0,2053	0,3372	0,3611	0,2837

R matrisinin her sütunundaki elemanları ilgili w_j değeri ile çarpılarak elde edilen ağırlıklandırılmış normalize matris Tablo 9’ da verilmiştir.

Tablo 9. Ağırlıklandırılmış karar matrisi

wj	0,1874	0,2420	0,1825	0,3187	0,0695
Alternatifler	Motor Gücü (kW)	Devir hızı (dev/dk)	Z Ekseni (mm)	Maksimum testere çapı (mm)	Fiyat (€)
A1	0,0323	0,0310	0,0219	0,0767	0,0120
A2	0,0658	0,0373	0,0479	0,1023	0,0181
A3	0,0335	0,0931	0,0287	0,0320	0,0147
A4	0,0335	0,0931	0,0287	0,0320	0,0158
A5	0,0335	0,0931	0,0410	0,0320	0,0171
A6	0,0335	0,0931	0,0615	0,0320	0,0177
A7	0,0335	0,0559	0,0396	0,0799	0,0178
A8	0,0770	0,0466	0,0684	0,1151	0,0198
A9	0,0323	0,0279	0,0273	0,0799	0,0129
A10	0,0584	0,0497	0,0479	0,1055	0,0231
A11	0,0795	0,0497	0,0684	0,1279	0,0242
A12	0,0497	0,0745	0,0581	0,0799	0,0230
A13	0,0497	0,0497	0,0479	0,0895	0,0194
A14	0,0497	0,0497	0,0615	0,1151	0,0197

Ele alınan problem için Eşitlik (14) ve Eşitlik (15) kullanılarak belirlenen İdeal ve İdeal Olmayan Çözüm Değerleri aşağıda Tablo 10’da verilmiştir. Kriterlerin fayda ya da maliyet kriteri olma durumu tespit edilmiştir.

Tablo 10. İdeal ve ideal olmayan çözüm değerleri

	W+	W+	W+	W+	W-
	K1	K2	K3	K4	K5
Aj+	0,0795	0,0931	0,0683	0,1278	0,0120
Aj-	0,0323	0,0279	0,0218	0,0319	0,0242

Eşitlik (16) ve Eşitlik (17) kullanılarak elde edilen uzaklık değerleri ile Eşitlik (18) kullanılarak elde edilen görelî yakınlık sonuçları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Uzaklık Değerleri ve Görelî Yakınlık Sonuçları

Alternatifler	si+	si-	Ci+	Sıralama
A1	0,1042	0,0635	0,6725	12
A2	0,0665	0,0875	1,4038	6
A3	0,1135	0,0684	0,6713	13
A4	0,1136	0,0682	0,6686	14
A5	0,1099	0,0691	0,6979	11
A6	0,1067	0,0756	0,7842	9
A7	0,0816	0,0696	0,9227	8
A8	0,0490	0,1061	2,2715	2
A9	0,1023	0,0658	0,7096	10
A10	0,0581	0,0914	1,6631	4
A11	0,0451	0,1175	2,7213	1
A12	0,0613	0,0820	1,4190	5
A13	0,0687	0,0775	1,2057	7
A14	0,0552	0,1042	1,9906	3

Tablo 11 incelendiğinde, 2.7213 değeri en büyük görelî yakınlık değerine sahip olmasından dolayı en ideal makinenin Alternatif 11 olduğu ve en son tercih edilecek makinenin de 0,6686 görelî değeri ile Alternatif 4 olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre; ideal olmayan çözüme en uzak olan alternatifin, Alternatif 11 olduğu ve ideal olmayan çözüme en yakın alternatifin ise Alternatif 4 olduğu söylenebilmektedir.

VI. SONUÇ VE ÖNERİLER

Makine seçimi problemi sadece doğal taş (mermer ve granit vb.) sektöründe faaliyet gösteren değil, diğer tüm sektörlerde öne çıkan bir maliyet unsuru olarak yer almaktadır. Makine problemleri uzun vadeli amorti sürelerine sahip olma özellikleri ile diğer kriterler bağlamında değerlendirilmesi gereken bir karar problemidir. Makine seçimi karar problemi doğrultusunda Entropi ve TOPSIS yöntemleri ile analizler yapılmış olup, ilgili yöntemlerin bu tür bir problemde kullanışlı olma durumu, literatürden örneklendirmeler ile tartışılmıştır.

Analiz sonuçları en önemli kriterlerin başta maksimum testere çapı olmak üzere, sonrasında kriter ağırlıkları sırasıyla devir hızı, motor gücü, z ekseni ve fiyat olarak sıralanmıştır. Bu sonuç, satın alımlarda fiyat unsurunun minimize edilmesi gerekliliğinin aksine bir durum olarak ortaya çıkmıştır. Seçilen A11 alternatifi ile en düşük fiyatlı makine alternatifi olan A1 arasında %49, 62 oranında bir fark vardır- en uygun fiyatlı modelin yaklaşık iki katı daha fazla fiyatlıdır.

İlk akla gelen fiyat kriterinin aksine, makine testere çapı ön plana çıkmıştır. Burada önem arz eden durum, testere çapının, mermer blokların kesiminden oluşan kaybı minimuma indirmesidir. Teknolojik gelişmelerin firmalara ve sektörlerle etkisinin de vurgulandığı bu bulgu ile karar almanın sadece firma sahipleri tarafından değil, konunun uzmanlarınca beraber değerlendirilmesi gereklidir. Alınacak her kararın alternatif maliyeti, rekabet avantajını etkileyecektir. Dolayısı ile pay sahibi yaklaşımı her zaman doğru kararı ifade etmemektedir.

Sonuç olarak, makine üreticileri için ürün fiyatının önem derecesinden ziyade teknolojik özellikleri ile piyasada faaliyet göstermesi gerekliliği olduğu vurgulanabilir. En iyi alternatif olarak seçilen A11'in fiyatı diğer 14 makine arasında en yüksek fiyatlı olmasına rağmen, diğer teknolojik özellikleri de içerisinde barındırması ile ilk sırayı almıştır. Bu durumda, sektör uygulayıcıları, rekabet avantajının anlamının derinlemesine inceleyerek, karar verme durumunda çeşitli ÇKKV yöntemlerinden faydalanmaları önerilmektedir. Bütünleşik yöntem yerine tek yöntem tercih edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ulutaş, A. (2017). EDAS yöntemi kullanılarak bir tekstil atölyesi için dikiş makinesi seçimi. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 169-183.
- [2] Ertuğrul, İ. (2007). Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci ve Bir Tekstil İşletmesinde Makine Seçim Problemine Uygulanması. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 171-192.
- [3] Akın, N. G. (2019). Makine Seçimi Probleminde Entropi-ROV ve CRITIC-ROV Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (62), 20-39.
- [4] Faydalı, R., & Erkan, E. F. (2020). Makine Seçim Probleminin Bulanık VIKOR Yöntemiyle İncelenmesi. *Zeki Sistemler Teori ve Uygulamaları Dergisi*, 3(1), 7-12.
- [5] Uzun, S., & Kazan, H. (2016). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden AHP TOPSIS ve PROMETHEE Karşılaştırılması: Gemi İnşada Ana Makine Seçimi Uygulaması. *Journal of Transportation and Logistics*, 1(1), 99-113.
- [6] Uzun, S., & Yıldırım, B. F. (2016). Equipment Selection in Ship Building Process: TOPSIS, MOORA, VIKOR Application. *Eurasian Academy of Sciences Eurasian Business & Economics Journal*, 2, 113-124.
- [7] Herişçakar, E. (1999). Gemi Ana Makine Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri AHP ve SMART Uygulaması. *Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi*, 99, 240-256.
- [8] Organ, A. (2013). Bulanık DEMATEL yöntemiyle makine seçimini etkileyen kriterlerin değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 157-172.
- [9] Gök Kısa, C. & Perçin, S. (2017). Bütünleşik Bulanık DEMATEL-Bulanık VIKOR Yaklaşımının Makine Seçimi Problemine Uygulanması. *Journal of Yaşar University*, 12(48), 249-256.
- [10] Kundakcı, N., & Sarıçalı, G. (2019). Bütünleşik KEMIRA-M ve COPRAS Yöntemi ile Mermer İşletmesi İçin Katrak Makinesi Seçimi. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(20), 1028-1061.
- [11] Perçin, S., & Ayan, T. Y. (2015). AHS ve Bulanık PROMETHEE Yaklaşımlarıyla Esnek Üretim Sistemleri Seçimi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 29(2), 555-575.
- [12] Wu, J., Sun, J., Liang, L. And Zha Y. (2011). "Determination of Weights for Ultimate Cross Efficiency Using Shannonentropy", *Expert Systems with Applications*, 38 (5): 5162-5165.

- [13] Kabadayı, N., & Dağ, S. (2017). Bulanık DEMATEL Ve Bulanık PROMETHEE Yöntemleri ile Kablo Üretiminde Makine Seçimi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(14), 239-260.
- [14] Görçün, Ö. F. (2019). Uluslararası Taşımacılık İşletmelerinin Çekici Araç Seçimlerinin Entegre AHP, Entropi ve TOPSIS Yöntemleri Kullanılarak Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 21(3), 899-922.
- [15] Tolun, B. G., & Tümtürk, A. (2020). AHP ile Bütünleşik Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Makine Seçimi: Tarım Makinaları Üretim İşletmesinde Bir Uygulama. *Yönetim ve Ekonomi: Celal Bayar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 27(1), 21-34.
- [16] Perçin, S., & Ayan, T. Y. (2015). AHS ve Bulanık PROMETHEE Yaklaşımlarıyla Esnek Üretim Sistemleri Seçimi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 29 (2), 555-575.
- [17] Uğur, L. O. . (2015). Yapı Makinesi Satın Alımında VIKOR Çok Kriterli Karar Verme Yönteminin Uygulanması. *Politeknik Dergisi*, 20 (4), 879-885.
- [18] Kul, Y., Şeker, A., & Yurdakul, M. (2014). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Alışılmamış İmalat Yöntemlerinin Seçiminde Kullanılması. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3), 589-603.
- [19] Ulutaş, A., & Çelik, D. (2019). Transpalet Seçimi Probleminin AHP ve EDAS Yöntemleri İle Değerlendirilmesi. *Business & Management Studies: An International Journal*, 7(2), 668-686.
- [20] Aloini, D., Dulmin, R., & Mininno, V. (2014). A Peer IF-TOPSIS Based Decision Support System For Packaging Machine Selection. *Expert Systems with Applications*, 41(5), 2157-2165.
- [21] Çakır, S., & Perçin, S. (2013). AB Ülkeleri'nde Bütünleşik Entropi Ağırlık-TOPSIS Yöntemiyle Ar-Ge Performansının Ölçülmesi. *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 32(1), 77-95.
- [22] Özgen, A., Tuzkaya, G., Tuzkaya, U. R., & Özgen, D. (2011). A Multi-Criteria Decision Making Approach for Machine Tool Selection Problem in A Fuzzy Environment. *International Journal Of Computational Intelligence Systems*, 4(4), 431-445.
- [23] Yıldırım, M., Altan, İ. M., & Gemici, R. (2018). Kurumsal Yönetim İle Finansal Performans Arasındaki İlişkinin Entropi Ağırlıklandırılmış TOPSIS Yöntemi İle Değerlendirilmesi: Bist'te İşlem Gören Gıda Ve İçecek Şirketlerinde Bir Araştırma. *Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi*, 11(2), 130-152.
- [24] Aytekin, A., & Karamaşa, Ç. (2016). BİST'te Faaliyet Gösteren Sigorta Şirketlerinin Finansal Performanslarının Bulanık Shannon Entropi Tabanlı Bulanık TOPSIS Yöntemiyle İncelenmesi. *The Journal of Operations Research, Statistics, Econometrics and Management Information Systems*, 5(1), 2017
- [25] Şahin, A., & Sarı, E. B. (2019). Entropi Tabanlı TOPSIS ve VIKOR Yöntemleriyle Bist-İmalat İşletmelerinin Finansal Ve Borsa Performanslarının Karşılaştırılması. *Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi*, 12(2), 255-270.
- [26] Ece, N. (2019). Holding Şirketlerinin Finansal Performans Sıralamasının Entropi Tabanlı TOPSIS Yöntemleri İle İncelenmesi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi (FESA)*, 4(1), 63-73.
- [27] Altan, İ. M., & Yıldırım, M. (2019). Sigorta Sektörünün Finansal Performansının Entropi Ağırlıklandırılmış TOPSIS Yöntemiyle Analizi ve Değerlendirilmesi. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 345-358.

- [28] Çatı, K., Eş, A., & Özevin, O. (2017). Futbol takımlarının finansal ve sportif etkinliklerinin Entropi ve TOPSIS yöntemiyle analiz edilmesi: Avrupa'nın 5 büyük ligi ve süper lig üzerine bir uygulama. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*,13(1), 199-222.
- [29] Öztel, A., Aydın, B., & Köse, M. S. (2018). Entropi Tabanlı TOPSIS Yöntemi İle Enerji Sektöründe Kurumsal Sürdürülebilirlik Performansının Ölçümü: Akenerji Örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*,9(24), 1-24.
- [30] Çakır, S., & Perçin, S. (2013). AB Ülkeleri'nde Bütünleşik Entropi Ağırlık-TOPSIS Yöntemiyle Ar-Ge Performansının Ölçülmesi. *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*,32(1), 77-95.
- [31] Yalçınkaya, Y., Dulupçu, M. A., & Baykul, A. (2018). TOPSIS Yöntemi ile Organize Sanayi Bölgelerinin Yatırım Ortamının Değerlendirilmesi: İBBS Düzey 3 Üzerine Bir Uygulama. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(1), 90-107.
- [32] Sarı, E. B. (2017). Endüstri İşletmelerinde Ar-Ge Projelerini Öncelik Sıralamasında Entropi Ağırlıklı TOPSIS Yöntemine Dayalı Çok Kriterli Bir Analiz. *International Journal of Academic Value Studies*,3(11), 159-170
- [33] Bakır, M., & Akan Ş. (2018). Havaalanlarında Hizmet Kalitesinin Entropi ve TOPSIS Yöntemleri İle Değerlendirilmesi: Avrupa'nın En Yoğun Havaalanları Üzerine Bir Uygulama. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 17(66), 632-651.
- [34] Demirarslan, P. Ç., Küçükönder, H., & Kınır, S. (2019). Entropi Tabanlı TOPSIS ve VIKOR Yaklaşımı ile Akademisyenler Üzerinde Bir Duygusal Performans Değerlendirme: Bartın Örneği. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*,18(69), 232-251.
- [35] Freeman, J., & Chen, T. (2015). Green supplier selection using an AHP-Entropy-TOPSIS framework. *Supply Chain Management: An International Journal*, 20(3), 327-340.
- [36] Sun, L. Y., Miao, C. L., & Yang, L. (2017). Ecological-Economic Efficiency Evaluation of Green Technology İnnovation in Strategic Emerging Industries Based on Entropy Weighted TOPSIS Method. *Ecological Indicators*, 73, 554-558.
- [37] Xu, W., & He, F. (2017). Entropy-TOPSIS method for selecting locations for electric vehicle charging stations. *Advances in Transportation Studies*, 3.
- [38] Gorgij, A. D., Wu, J., & Moghadam, A. A. (2019). Groundwater Quality Ranking Using The İmproved Entropy TOPSIS Method: A Case Study İn Azarshahr Plain Aquifer, East Azerbaijan, Iran. *Human And Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(1-2), 176-190.
- [39] Wang, Y; Wen, Z. & HuifangLi (2020). Symbiotic Technology Assessment in İron And Steel İndustry Based on Entropy TOPSIS method. *Journal of Cleaner Production*, 260, 1-13.
- [40] Zhang, H., Gu, C. L., Gu, L. W., & Zhang, Y. (2011). The Evaluation of Tourism Destination Competitiveness by TOPSIS & İnformation Entropy-A Case in The Yangtze River Delta of China. *Tourism Management*, 32(2), 443-451.
- [41] Özdağoğlu, A., Yakut, E., & Bahar, S. (2017). Machine Selection İn A Dairy Product Company with Entropy and SAW Methods İntegration. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*,32(1), 341-359.
- [42] Koca, G., Ekinci, F., & Şimşek, M. (2019). Vergi gelirleri bakımından OECD ülkelerinin performansının bütünleşik entropi-ARAS yöntemi ile değerlendirilmesi. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 18(70), 964-985.



- [43] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making methods and application. New York: Springer-Verlag

Araştırma Makalesi - Research Article

Siklofosfamid Nedenli Kan Hücreleri ve Kemik İliği Toksisitesi Üzerine Escinin Koruyucu Etkilerinin Sıçanlarda Araştırılması

Mustafa Cengiz^{1*}, Adnan Ayhancı², Hatice Mehtap Kutlu³

Geliş / Received: 20/01/2020

Revize / Revised: 30/06/2020

Kabul / Accepted: 01/07/2020

ÖZ

Siklofosfamid (CPM), metabolitleri nedeniyle kanserli hücrelerin yanı sıra sağlıklı dokularda da toksisiteye neden olan yaygın olarak kullanılan bir antineoplastik ilaçtır. Bu ilacın ana dezavantajı miyelosupresyondur. Escin (ES), antioksidan, antienflamasyon ve anti-ödem gibi biyolojik özelliklere sahip doğal bir triterpenoid saponin karışımıdır. Bu çalışma, CPM'nin kan hücreleri ve kemik iliği üzerindeki toksik etkileri üzerine ES'nin olası etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Sprague Dawley erkek sıçanlar, kontrol grubu, 200 mg / kg CPM, 10 mg / kg ES ve CPM+ES olmak üzere 4 farklı gruba ayrıldı. Tüm gruplardaki sıçanlar enjeksiyonlardan 1 gün sonra kesildi. Hayvanlar anestezi altında kesildikten sonra kemik iliği ve kan örnekleri alındı. CPM grubunda eritrosit, hemoglobin, hematokrit, lökosit (% 97), trombositler (% 45) ve kemik iliği hücreleri (% 93.6) sayısında kontrol grubuna göre bir azalma vardı. Tersine, ES + CPM' grubundaki kan hücreleri (eritrosit, hemoglobin, hematokrit, lökosit ve trombositler) ve kemik iliği hücreleri CPM verilen grup ile karşılaştırıldığında artmıştır. Sonuçlarımız, ES ile sıçanların tedavi edilmesinin, CPM'nin kan hücreleri ve kemik iliği üzerindeki toksik etkilerini azaltmaya yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler- Escin, Sitoprotektif, Siklofosfamid, Hematotoksisite, Sıçan

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: mustafacengizogu@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6925-8371>)

Department of Mathematics and Science Education, Siirt University, Siirt, Turkey

²İletişim: aayhanci@ogu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4866-9814>)

Department of Biology, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey

³İletişim: hmkutlu@eskisehir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8816-1487>)

Department of Biology, Eskisehir Technical University, Eskisehir, Turkey

Investigation into the Protective Effects of Escin on Blood Cells and Cyclophosphamide-Induced Bone Marrow Toxicity in Rats

ABSTRACT

Cyclophosphamide (CPM) is an extensively used antineoplastic drug that induces toxicity in the health cell because of its metabolites. The main disadvantage of this drug is myelosuppression. Escin (ES) is a natural mixture of triterpenoid saponins that has biological properties such as antioxidant, anti-inflammation, and anti-edematous. The present study aims to investigate the possible effects of ES upon the toxic effects of CPM on blood cells and bone marrow. Sprague Dawley male rats were chosen and categorized into 4 different groups, including the control group, 200 mg/kg CPM, 10 mg/kg ES and ES+CPM. Rats in all groups were discontinued 1 day after injections. After the animals were cut under anesthesia, bone marrow and blood samples were collected. A fall in the number of erythrocyte, hemoglobin, hematocrit, leukocyte (97%), platelets (45%), and bone marrow cells (93.6%) was seen in the CPM group. Conversely, blood cells (erythrocyte, hemoglobin, hematocrit, leukocyte, and platelets), as well as bone marrow cells in ES + CPM had increased by comparison with CPM. Our results show that treating rats with a selected dose range of ES may help decrease the toxic effects of CPM upon blood cells and bone marrow.

Keywords- *Escin, Cytoprotective, Cyclophosphamide, Hematotoxicity, Rats*

I. INTRODUCTION

Cyclophosphamide (CPM), renowned as a cytotoxic agent, is not just an anti-neoplastic but also an immunosuppressive agent widely used in treating many cancers. However, it a prodrug that has got to be metabolized in the living system to form reactive components like acrolein and phosphoramidate mustard [1]. Previous studies have shown these toxic metabolites to decrease lung microsomal enzyme activities, in addition to preventing mammals' antioxidant defense system from functioning properly [2]. The fact is that long-standing CPM treatment may result in side-effects like marked myelosuppression [3], known as a potentially toxic and a dose-limiting effect of CPM. By acting not only on cyclic but also on intermitotic cells, CPM contributes to the cross-linking of DNA, thus inhibiting the synthesis of DNA and causing an overall reduction in immune component cells [4]. Apart from its carcinogenic and teratogenic potentials, CPM also holds recognized toxic effects upon the heart, bladder, and hematopoietic system. It may also cause leucopenia and reduce the platelet number [5]. According to many studies, CPM exposure increases intracellular reactive oxygen species (ROS) production, suggesting that biochemical plus physiological disorders may be caused by oxidative stress [6]. Studies into mammals have revealed that CPM may also give severe harm to the blood-forming tissues of bone marrow. Also, it may temporarily cause a fall in circulating PMNs (polymorphonuclear neutrophils) and so affect our innate immune system. Furthermore, CPM can result in a decrease in microsomal enzyme activity and weaken our antioxidant defense system. This, in turn, weakens our specific immunity by directly depleting lymphoid tissues and keeping the host from giving an acceptable specific immune response [7].

Escin (ES) is known as a regular mixture of triterpene saponins, primarily comprising A, B, C, and D escin (Figure 1) [8]. We know of no less than 3 kinds of pharmacodynamic actions that are closely associated with ES, antioxidant and venotonic properties, as well as anti-edematous properties and anti-inflammatory activities [9, 10]. ES is usually preferred for patients with severe trauma injury as an effective anti-inflammatory and anti-edema agent. As for our study, the rats had been injected ES prior to CPM treatment to investigate the effects of ES on CPM-related hematotoxicity.

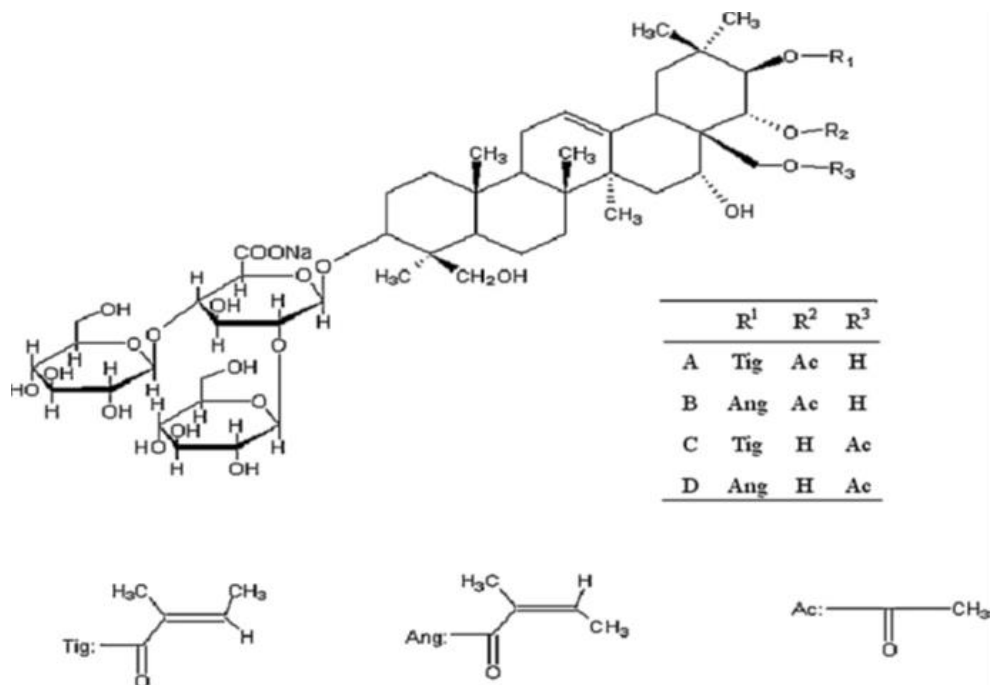


Figure 1. The structure of ES

II. MATERIAL AND METHODS

A. Materials

Not only ES but also CPM was cultivated from Sigma. 500 mg of SF had been dissolved in 25 mL saline in preparation for injection. As for the chemical injections, they were given to the rats intraperitoneally (i.p.) with sterile, disposable syringes subsequent to freshly-prepared solutions. In preparing the orally-given solution, 10 mg/kg dose of ES was dissolved in 0.5 mL of distilled water.

B. Treatment

Our study was launched only after ethical approval had been obtained from the Experimental Animals Ethics Committee of Eskişehir Osmangazi University. The rats to be studied were obtained from the Public Health Center. Care was taken to feed the animals in a standard environment, with drinking water and standard food pellets prepared carefully. The rats were diligently kept under standard humidity (45–50%), temperature (22 ± 2 °C), and light (12 h light/12 h dark) conditions. Their weight was measured not only during the injection process but also before they were slaughtered in the determination of the dose to be applied. Injection of the second group that was given solely CPM was achieved on the very first day. The very next day, they were anesthetized. As to the group given both CPM and ES, the injection was achieved on the first day. Under ether anesthesia, we obtained the blood samples with aid of a cardiac puncture. The study animals were slaughtered on the second day. We flushed their bone marrow with saline into a test tube after both femurs had been dissected. A cell counter (Coulter) was used in counting the homogenized bone marrow, blood cells, and nucleated cells.

C. Statistical Analyses

The expression of the data of the animal experiments was achieved as the standard error of the mean (\pm SEM). As for the analysis of the independent measurements and continuous data showing a normal distribution, One Way Anova was used. Furthermore, the Kruskal-Wallis test was used in scoring the variants showing an abnormal distribution. The differences in the experimental groups were regarded as significant if the p-value was <0.001 and <0.05 .

III. RESULTS

The rise in the number of leukocytes, erythrocyte, hemoglobin, hematocrit, and platelet in the group given 10 mg/kg of ES was not of a statistical significance ($p>0.05$). On the other hand, the rise in the number of bone marrow–nucleated cells was of statistical significance ($p<0.01$). However, 200 mg/kg of CPM resulted in a 97% reduction in leukocyte cells when no other chemicals were added to the dose ($p<0.001$). Injected along with CPM, 10 mg/kg of ES lowered leukocytes as much as 18% ($p<0.01$) (Figure 2). Interestingly, platelets of rats given 200 mg/kg of CPM alone decreased by 45% ($p<0.001$). As for the results of a combination of both CPM and ES, the number of thrombocytes decreased as much as 31% ($p<0.05$) (Figure 3). Bone marrow–nucleated cells reduced as much as 93,6% once 200 mg/kg of CPM was injected ($p<0.001$). In comparison with the respective three doses of CPM, 10 mg/kg of ES induced as much as 49% recovery in bone marrow–nucleated cell numbers (Figure 4). When used alone, CPM decreased the number of erythrocytes as much as 27% ($p<0.01$) (Figure 5). When given with a respective dose of CPM, 10 mg/kg of ES lowered leukocytes as much as 17% ($p<0.01$) (Figure 2). The number of hemoglobin and hematocrit in the animals given 200 mg/kg of CPM alone fallen as much as 19 and 23 %, respectively ($p<0.05$). Given along with a respective dose of CPM, 10 mg/kg of ES enlarged the number of hemoglobin and hematocrit by 21 and % 20 ($p>0.05$) (Figures 6 and 7).

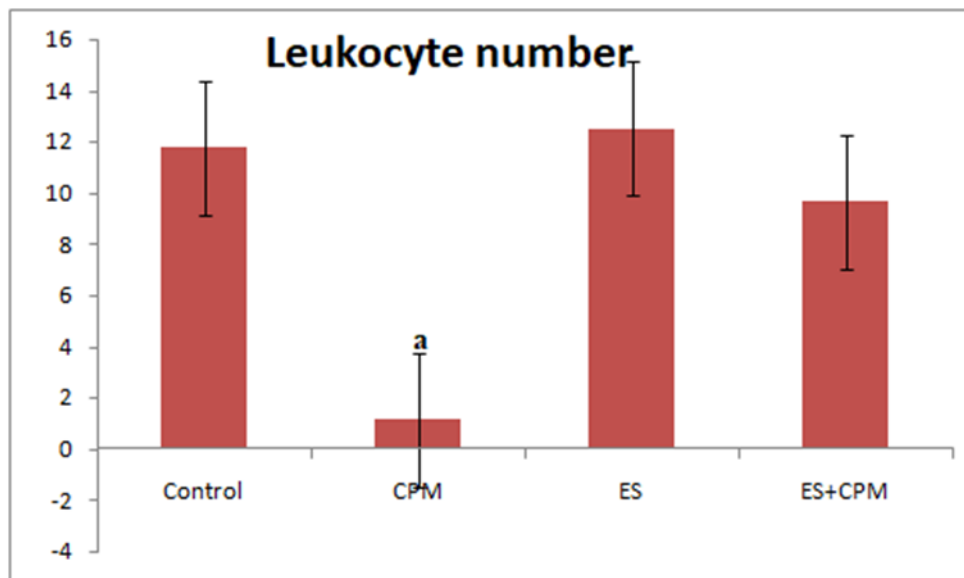


Figure 2. The number of leukocytes in the existence of all groups (X10³/μL). ^ap<0.001 significant difference compared to control

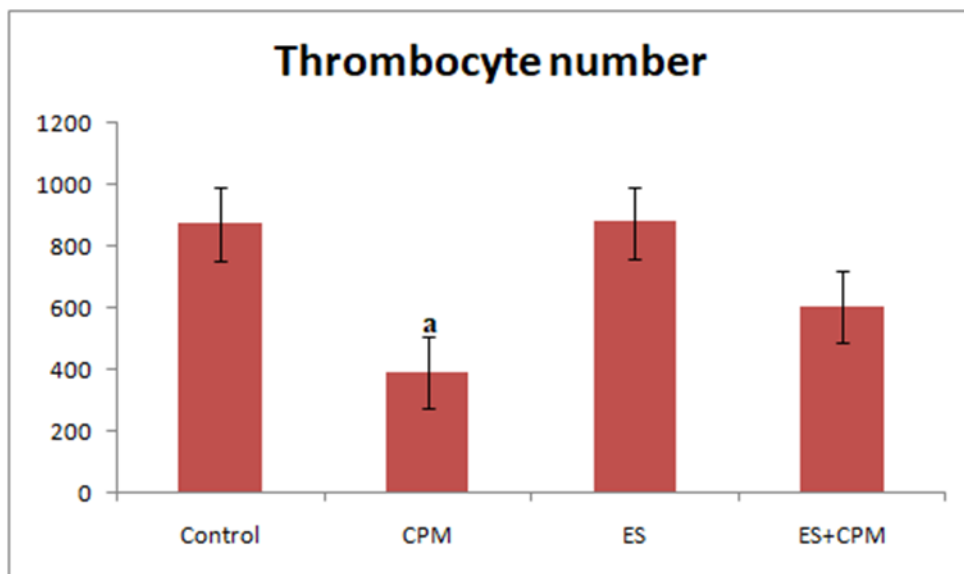


Figure 3. The number of peripheral thrombocytes in the existence of all groups (X10³/μL). ^ap<0.001 significant difference compared to control

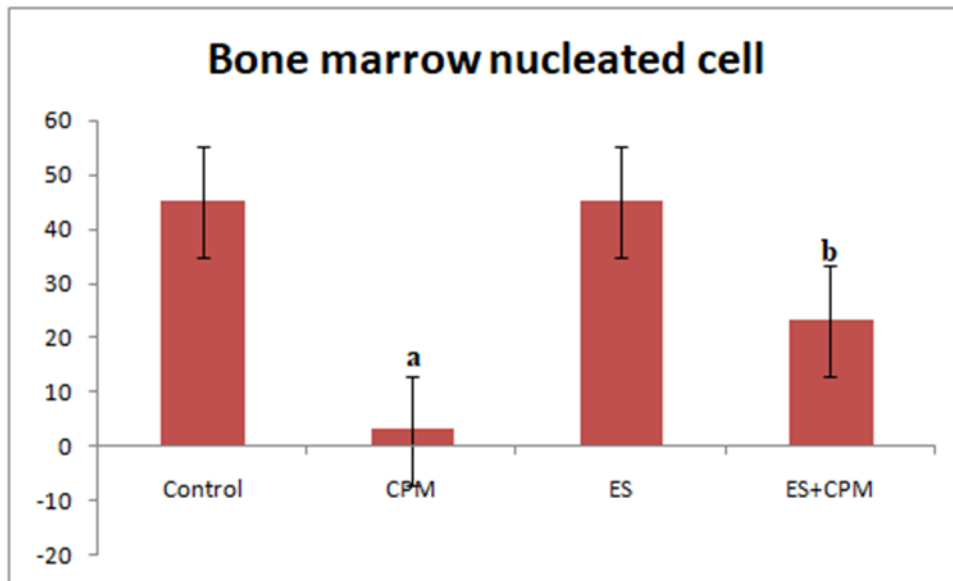


Figure 4. The number of bone- marrow-nucleated cells in the existence of all groups (X10³/μL). ^a*p*<0.001 significant difference compared to control; ^b*p*<0.05 significant difference compared to control

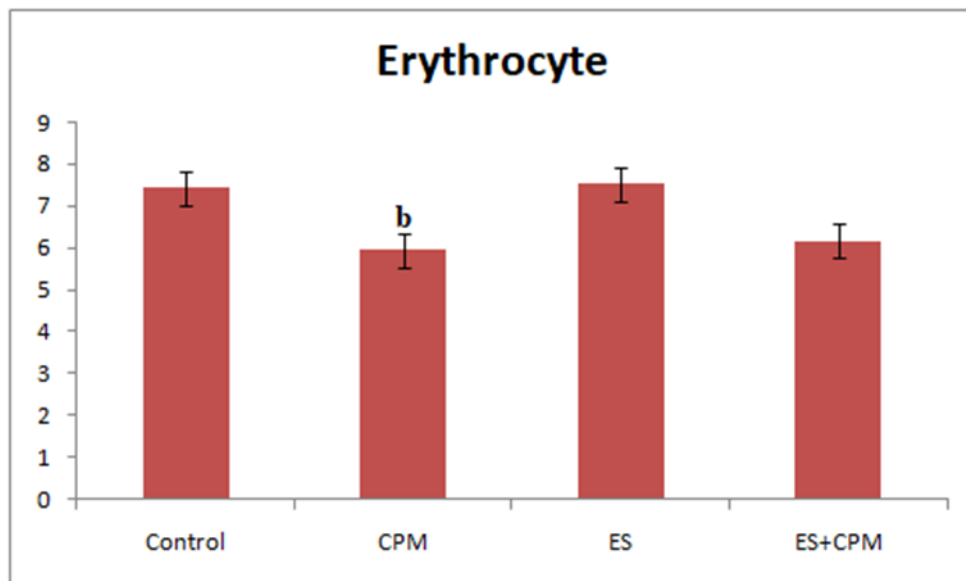


Figure 5. The number of erythrocytes cells in the existence of all groups (X10⁶/mm³). ^b*p*<0.05 significant difference compared to control

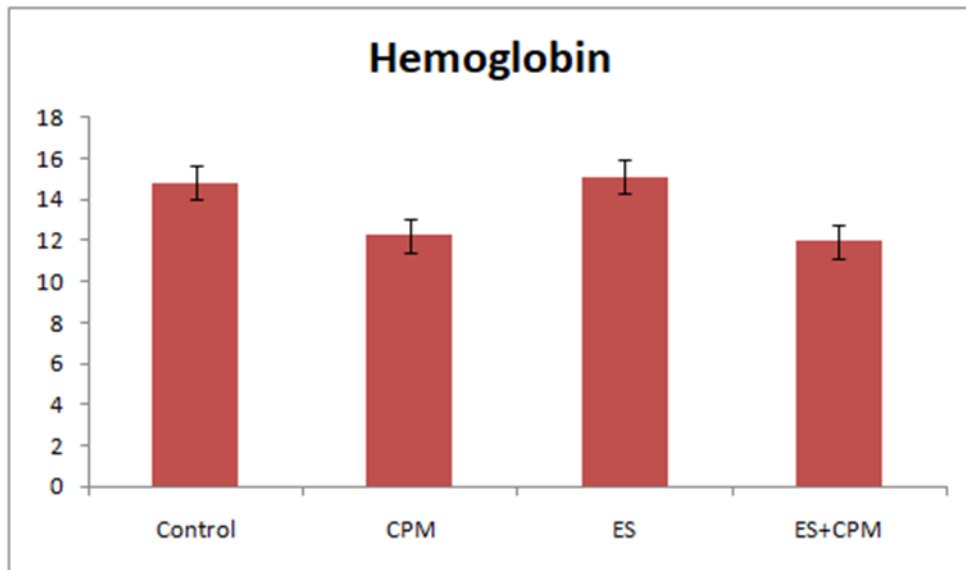


Figure 6. The number of hemoglobin the existence of all groups (g/dL)

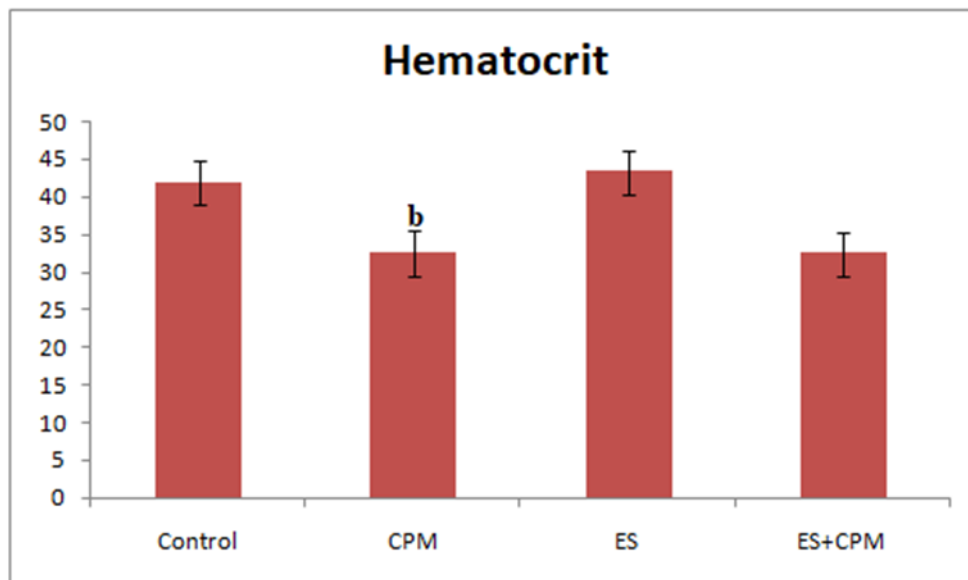


Figure 7. The number of hematocrit the existence of all groups (%).^b $p < 0.05$ significant difference compared to control

IV. RESULTS

The chemotherapeutic practicality of alkylating agents is closely related to their capability to type a diversity of DNA adducts which can reasonably change DNA structure or function or both at the same time as far as their cytotoxic effect on the cells are concerned. A large number of them are known to go through a rather intricate activation process before they are able to make reactive intermediates happen. The preliminary activation reaction as regards CPM achieved through the microsomal oxidation system in the liver generates 4-hydroxy CPM, a cytotoxic metabolite, diffusing from hepatocytes into plasma before they could be travel in the whole body. Then, 4-hydroxy CPM is transformed into cytotoxic metabolites like PAM and ACR. This situation results in myelosuppression [11, 12], which we know to be a chief potential toxic and dose-limiting adverse effect of CPM.

By acting upon not just cyclic but also inter-mitotic cells, CPM leads to cross-linking of DNA and inhibition of DNA synthesis, which in turn, usually depletes immune component cells [13]. One study reports that 150 mg/kg CPM lowered the leukocyte numbers by 92%, the platelet numbers by 54%, and the bone marrow cell numbers by 94% [14]. In the same vein, a single dose of CPM injection caused leukocyte counts to go down [15]. Moreover, CP (40 mg/kg) given to baboons has caused a temporary fall in White Blood Cell count [16]. Another experimental study emphasizes that CP (20 and 40 mg/kg) may have a mutagenic effect upon the spleen and the bone marrow [17]. In a previous study, we demonstrated that 200 mg/kg CP administration reduced significantly the numbers of erythrocyte (20%), leukocyte (96%), platelet (41%), and hemoglobin (21%), and hematocrit [18]. Trasler et al. [19] referred to the effects of erythrocyte, leukocyte, and bone marrow cell count in that they decreased dramatically when the CPM was given in high doses to the mice. In our study, we witnessed a noteworthy reduction in the number of erythrocytes, leukocytes (97%), platelet (45%), hemoglobin, hematocrit, and bone marrow nucleated cells (93.6%) in the 200 mg/kg CPM group when compared to the control one. Our study results are remarkably consistent with those reported in the literature.

As for ES, it is a natural combination of triterpene saponins that is obtained from the seeds of *Aesculus Chinensis Bge.* or *Aesculus wilsonii Rehd.*, largely consisting of A, B, C, and D escin (Figure 1). Mounting evidence suggests that administering ES intravenously results in anti-anti-oxidant [10, 20], inflammatory [8], and anti-edematous effects [21]. Our study is an original one in that while there are many studies into oral and intravenous effects of ES upon the liver, inflammation, and intestinal damage, no studies have been made as regards the protective effects of ES upon bone marrow, blood cell toxicities. Our study is an original one in that while there are many studies into the effects of ES upon the liver [10], inflammation [8], and intestinal damage (whether orally or intravenously), we do not come across any studies into the protective effects of ES upon bone marrow and blood tissue toxicities. In our study, in the group given CPM alone, we observed a reduction in the number of leukocytes, thrombocytes, erythrocytes, hemoglobin, and bone marrow cell counts as 97%, 45%, 20%, 21%, and 93%, respectively when compared to the control group. These rates were of high statistical significance. On the other hand, in the group given both CPM and 1m mg/kg ES, the reduction in the number of leukocytes, thrombocytes, erythrocytes, hemoglobin, and bone marrow cell counts was 18%, 31%, 19%, 20%, and 49%, respectively when compared to the group given CPM alone. These rates were also of high statistical significance. Therefore, ES appears to be toxic neither for bone marrow nor blood cells on its own while CPM is already known to be toxic for bone marrow, leukocytes, and platelets. Based on our study results we conclude that ES may provide protection against the toxic effects of CPM. We, therefore, believe that ES is a potentially effective drug to be used in treating CPM-related damage, which can help prevent damage or treat CPM toxicity. Finally, we suggest that further studies should be conducted in order to discover the underlying mechanism of how ES protects against CPM toxicity.

V. REFERENCES

- [1] Ayhanci, A., Heybeli, N., Sahin, İ. K., Cengiz, M. Myelosuppression and Oxidative Stress Induced by Cyclophosphamide in Rats: The Protective Role of Selenium. *Adiyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 252-265.
- [2] Kumari, J., Shaoo, P. K. (2005). Effects of cyclophosphamide on the immune system and disease resistance of Asian catfish *Clarias batrachus*. *Fish Shellfish Immunology*, 19: 307–316..
- [3] Shah, A. S., Wakade, A. S., Juvekar, A. R. (2008). Immunomodulatory activity of methanolic extract of *Murraya koenigii* (L) Spreng leaves. *Ind J Exp Biology*, 46 (7): 505–509.
- [4] George, K. S., Rajesh, R., Sunil Kumar, S., Sulekha, B., Balaram, P. (2008). A polyherbal ayurvedic drug *Indukantha Ghritham* as an adjuvant to cancer chemotherapy via immunomodulation. *Immunobiology*, 213:641–649
- [5] Langford, C. A. (1997). Complications of cyclophosphamide therapy. *Eur Arch Otorhinolaringol*, 254:65–72.
- [6] Manda, K., & Bhatia, A. L. (2003). Prophylactic action of melatonin against cyclophosphamide-induced oxidative stress in mice. *Cell Biol. Toxicology*, 19:367–372.

- [7] Kumar, K. B. H., Kuttan, R. (2005) Chemoprotective activity of an extract of *Phyllanthus amarus* against cyclophosphamide induced toxicity in mice. *Phytomedicine*, 12:494–500.
- [8] Fu, F., Hou, Y., Jiang, W., Wang, R., Liu, K. (2005). Escin: inhibiting inflammation and promoting gastrointestinal transit to attenuate formation of postoperative adhesions. *World J. Surg.*, 29, 1614–1620.
- [9] Sirtori, C.R. (2001). Aescin: pharmacology, pharmacokinetics and therapeutic profile. *Pharmacol. Res.*, 44, 183–193.
- [10] Cengiz, M., Kutlu, H. M., Peker Cengiz, B., Ayhancı, A. (2020). Escin attenuates oxidative damage, apoptosis and lipid peroxidation in a model of cyclophosphamide-induced liver damage. *Drug and Chemical Toxicology*, 1-8.
- [11] Cengiz, M., Yeşildağ, Ö., Ayhancı, A. (2018). Siklofosfamid Nedenli Hematoksisite Üzerine Karvakrolün Sitoprotektif Etkileri. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 5(2), 125-130.
- [12] Liang, J., Huang, M., Duan, W., Yu, X. Q., Zhou, S. (2007). Design of new oxazaphosphorine anticancer drugs. *Curr Pharm Design*, 13:963–978.
- [13] George, K. S., Rajesh, R., Sunil-Kumar, S., Sulekha, B., Balaram, P. (2008). A polyherbal ayurvedic drug—Indukantha Ghritham as an adjuvant to cancer chemotherapy via immunomodulation. *Immunobiology*, 213:641–649.
- [14] Ayhancı, A., Yaman, S., Appak, S., Gunes, S. (2009). Hematoprotective effect of seleno-L-methionine on cyclophosphamide toxicity in rats. *Drug and Chemical Toxicology*, 32:4, 424-428.
- [15] Fraiser, L. H., Kanekal, S., Kehrer, J. P. (1991) Cyclophosphamide toxicity: characterizing and avoiding the problem. *Drugs*, 42:781–795.
- [16] Schuurman, H. J., Smith, H. T., Cozzi, E. (2005). Tolerability of cyclophosphamide and methotrexate induction immunosuppression in nonhuman primates. *Toxicology*, 213:1–12.
- [17] Moore, F. R., Urda, G. A., Krishna, G., Theiss, J. C. (1995). An invivo/ invitro Method for Assessing Micronucleus and Chromosome Aberration Induction in Rat Bone Marrow and Spleen. 1. Studies with Cyclophosphamide. *Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects*, 335 (2): 191-199.
- [18] Cengiz, M. (2018). Hematoprotective effect of boron on cyclophosphamide toxicity in rats. *Cell Mol. Biol.*, (Noisy le Grand). 64 (5) 62-65.
- [19] Trasler, J. M., Hales, B.F., Robaire, B. (1987). A time-course study of chronic paternal cyclophosphamide treatment in rats: effects on pregnancy outcome and themalere productive and hematologic systems. *Biology of Reproduction*, 37(2):317-26.
- [20] Hu, X.M., Zeng, F.D. (2004). Protective effects of sodium beta-aescin on ischemia reperfusion injury in rat brain. *Acta Pharm. Sin.*, 39 (6), 419–423.
- [21] Jiang, N., Xin, W., Wang, T. et al. (2011). Protective effect of aescin from the seeds of *Aesculus hippocastanum* on liver injury induced by endotoxin in mice. *Phytomedicine*, 18(14), 1276–1284.

Araştırma Makalesi - Research Article

Bilgiyi Matematiksel İfadeye Gizlemek İçin Yeni Bir Yaklaşım

Muhammed Milani^{1*}

Geliş / Received: 18/10/2019

Revize / Revised: 07/06/2020

Kabul / Accepted: 22/06/2020

ÖZ

Bilgi gizleme son zamanlarda çok ilgi gördü. Steganografi için çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve aynı zamanda gizli verileri tespit etmek için uygun steganalizler tasarlanmıştır. Bununla birlikte, steganaliz tarafından dikkate alınmaması için yeni bir kapak türünde sunulan bir yaklaşım daha az şüpheli olabilir. Bu makale bir mesajı matematiksel ifadeye dönüştürebilen bir yöntem önermektedir. Oluşturulan matematiksel ifade, oldukça güvenli bir metinle birlikte mesajı iletmek için bir kapak olarak kullanılabilir. Önerilen yöntem, uygun bir stokastik dilbilgisi kullanarak, belirli bir metne dayalı matematiksel bir ifade oluşturma yeteneğine sahiptir. Dilbilgisi kurallarının olasılığı, taşıyıcı metne göre ve matematiksel ifadelerin türüne göre belirlenebilir.

Anahtar Kelimeler- Bilgi Gizleme, Steganografi, Steganaliz, Matematiksel İfade, Stokastik Dilbilgisi

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: mmilani@bandirma.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2450-0280>)
Bilgisayar Mühendisliği, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Balıkesir/Bandırma - Türkiye

A Novel Approach for Hiding Information into Mathematical Expression

ABSTRACT

Information hiding has received a lot of attention recently. Various methods have been developed for steganography, and at the same time, proper steganalysis has been designed to detect hidden data. However, an approach that is introduced in a new type of cover can be less doubtful due to the lack of attention to steganalysis analyses. This paper proposes a method that can convert a message into a mathematical expression. The generated mathematical expression can be used as a cover to transmit the message along with a highly secure text. The proposed method, using a suitable stochastic grammar, has the ability to create a mathematical expression based on a given text. Probability of grammar rules can be determined in accordance with the carrier text and based on the type of mathematical expressions.

***Keywords-* Information Hiding, Steganography, Steganalysis, Mathematical Expression, Stochastic Grammar**

I. INTRODUCTION

Cryptography is a widely used technique for secret communication [1] and is applied by various encryption and decryption methods. However, cryptography alone is not enough for secure information transmission because the encrypted text may attract attention. To address this problem, steganography is one of the ways proposed to send information securely using stego-texts that cause the slightest doubt. Typically, in these systems, texts can be concealed as messages in a variety of covers. An inserted message should only cause subtle changes in the covers. Generally, the covers can be classified in four categories: text, image, video, and audio [2]. Of course, there may be other covers that are not included in these four categories, such as executable files [3]. Among these categories, image-based steganography has been used more widely and data is included in parts of the image that is less recognizable [4].

Video is also known as a cover that requires a large number of operations to insert the message [5]. But, because of the ability to insert a large volume of messages, they have attracted attentions [6]. Inserting a message in audio is also possible. Usually, the human ear can comprehend sounds that range from 20HZ to 20KHZ [7]. So, in some audio-type covers, this feature is used to insert data in an unrecognizable manner [8]. Texts have also been used as a cover in some steganography methods [3]. Although the number of text-based methods is less than other methods, the large volume of text data-type in these methods has made them attractive.

In contrast to steganography, steganalysis [9] is the science of unauthorized extraction of the inserted message. It can be said that steganalysis and steganography are similar to a hide-and-seek game [10]. With the development of a variety of methods for steganography, several methods have been developed for Steganalysis [11]. Obviously, the new methods are more reliable in secure information transmission as the steganalysis has not focused on new covers yet.

In this paper, a method for the steganography of data in mathematical expressions is proposed as a new cover generation method. In terms of the characteristics and nature of mathematical expressions, they can be a good place to hide information. Efforts have been made to produce texts that seem real [12]. With the same view, it is possible to propose ways to generate mathematical expressions that are not ambiguous.

Mathematics has an important root in human evolutionary history. Computers are very good at solving problems if correct commands are used. Symbolic computation or algebraic computation refers to the development and evaluation of mathematical expressions. Computer applications that can conduct symbolic calculations are called Computer Algebra Systems (CAS) or symbol manipulation systems. The increasing use of CAS systems has enlarged the rule of computer systems in the various areas. For example, computer algebra has an important role in designing and experimenting formulas that are required in numerical programs.

To hide sensitive data, we can also use the techniques that are proposed in CAS and provide a suitable platform for steganography systems. In this paper, using the concept of CAS, an efficient method of Cover Generation is proposed. The proposed method generates mathematical expressions using the rules that are chosen by the message. The generated expression is the cover that carries the message. Because math phrases have not yet been used to insert the message, it can cause the least sensitivity to steganalysis systems.

In Section 2, Cover Generation Steganography systems are expressed, and then the mathematical expressions and the operations that are applicable to them are described. These operations involve producing, parsing, and displaying math phrases. Also, in this section we will propose a new method for insertion and retrieval of a message. Finally, we evaluate the proposed method and conclude in Section 3.

II. MATERIALS and METHODS

A. Cover Generation Steganography

Steganography involves hiding information in cover objects; be it video, audio, image or even text. Unlike other steganography methods in which we decide which cover object (audio, video, text or image) to hide secret

message in, the cover generation technique does the opposite. In the cover generation technique, the steganography system generates the cover object.

Instead of embedding information into a cover, it is possible to generate the cover based on the message by using rules of a proper grammar. Thus, the generation cover can be sent as destinations for message carriers. If the natural cover is produced, this method can be transmitting data with higher confidence. Because general covers are mostly checking by steganalysis.

A well-known method in linguistic steganography is mimic functions [12]. Mimic functions are used to generate cover text using statistical methods which can somehow make sure that the generated message cannot be detected by computers outfitted with statistical profiles as humans cannot read the huge traffic of information passing through networks. The mimic function is built from a function called Huffman compression, and used to make the machine crazy of fool so that the mimic texting will be looking completely meaningless or like nonsense text, just because of the error of a grammar created to fool the machine. In automated generation with the help of style source and large and well-organized dictionary of words, secret message bits can be transformed into stego-text which cannot be detected easily by the adversaries [13].

On the other hand, there are a variety of algorithms which can implement cover generated audio steganography like the one proposed in [14]. In this method, the sender establishes the vital basic rules (i.e. amplitude, scale to be used and sampling rate) of the communication. Furthermore, as proposed in [15], a cover image can be generated from text using an immature technique. The technique can be implemented in both gray scale and RGB images. In this paper, the production of mathematical expressions as a new medium has been taken into consideration, and a method has been proposed using proper grammar rules to embed a message into a mathematical expression.

B. Mathematical Expressions

Mathematical expressions are held in different forms according to the special structure. One of the most common methods is the tree structure. The relationship between the operators and operands of an expression and its structure can be shown graphically by using expression trees. Each operator is represented by a node. Operators with the lowest precedence appear at the top of the tree, whereas the operators with higher precedence are put at the bottom of the tree. Each level shows the connection between an operator and its operand or operands.

Processes such as production, traversing and conversion into readable forms can be performed on expression trees. However, a proper grammar is required to work with this structure. Context Free Grammars (CFG) is used to parse and produce mathematical expressions. Input string passes through a parser which verifies the syntax of that input. At the same time an Abstract Syntax Tree (AST) which is a suitable structure to work with mathematical expressions is created. This tree serves as the main core part of the proposed methodology to apply various improvement algorithms on input data. The next section will address the development of an appropriate grammar for the proposed approach.

1) *Grammar Definition:* In this paper, we will focus on mathematical rules and introduce some grammars to work with them. Backus-Naur Form (BNF) grammar is useful to define context-free grammars in programming languages as it has simple notations; recursive structures, and widely available. We use this type of grammars because BNF is supported by many compiler generation tools such as YACC [16], LEX [17], and JavaCC[18].

Each rule in this grammar has a non-terminal on the left side and a collection of terminals and non-terminals on the right. During the language generation, depending on the top-down or bottom-up parsing method, a rule will be expanded or collapsed.

List 1. An E-BNF grammar for mathematical expressions

```

G = {Σ, T, V, P, S}
V = {expr, op, func, var, number, digit} ⊆ Σ
T = {x, Sin, Cos, Tan, Log, Exp, Sqrt, +, -, *, /} ⊆ Σ
Σ = T ∪ V
S = { expr }
Production :
<expr> ::= <expr><op><expr>
          | (<expr>)
          | <func>(<expr> )
          | <var>
          | <Number>
<op> ::= '+' | '-' | '*' | '/' | '^'
<func> ::= 'Sin' | 'Cos' | 'Tan' | 'Log' | 'Exp' | 'Sqrt'
<var> ::= 'x'
<number> ::= '-' ? <digit> + ( '.' <digit> + )?
<digit> ::= [ '0'-'9' ]

```

Mathematical expressions as mentioned in this paper can contain operations such as addition or subtraction, functions such as sin or cos, special symbols such as integral, etc. Given a grammar developed for a particular mathematical expression, all operators, functions, and symbols, variables and numbers will be members of the terminal set. The non-terminal set will be determined based on the production rules of the grammar. The designed grammar must generate arithmetic expressions with an operator and its operands, or a mathematical function with arguments. The operand or argument itself might be a number, a variable, or another mathematical expression.

The production rules of a grammar might be recursive since there are operands of the expression type. For various types of mathematical expressions, different grammars can be used. In this section, a derivative system for mathematical expressions with some modifications to a grammar mentioned in [19] is developed. This grammar is called Extended-BNF grammar and shown in List 1.

The extended-BNF in List has five operators and six functions. A simple mathematical expression usually contains these operators. However, it can be modified with the insertion of some other operators, various functions, and particular symbols.

2) *Grammar Conversion*: The grammar defined in the previous section is general and can generate any math expressions. However, this grammar has a problem of generating more than one expression tree for a given expression. As a simple example, two different expression trees for "7 + 2 + 5" are given in Figure 1.

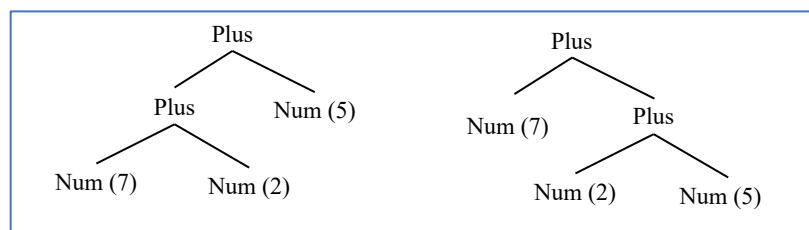


Figure 1. Two different ASTs for the "7+2+5" expression

This situation may cause major problems for the proposed method in this paper even if there are no problems with some systems. In steganography, this can lead to the extracting of a different message from the embedded message. Therefore, there is a need to develop the grammar appropriately.

The basic problem of the grammar presented in List 1 is the existence of left recursive rules. This type of rules creates ambiguity in generated mathematical expressions. Therefore, the grammar that has been used must be developed in a way that the rules do not have this property. In the production of the terms discussed in this article, there is no need to observe the priority of the operator. Because the main purpose is the production of the expression, the evaluation is not intended. In addition, the rules written for a non-terminal must be numbered in order to use at the time of execution of the algorithm based on these numbers. Accordingly, the desired grammar is developed in **List 2**.

List 2. Modified grammar for mathematical expressions

$G = \{\Sigma, T, V, P, S\}$
 $V = \{E, C, \text{Num}, \text{Digit}, \text{Var}\} \subseteq \Sigma$
 $T = \{x, \text{Sin}, \text{Cos}, \text{Tan}, \text{Cot}, \text{Log}, \text{Exp}, \text{Sqrt}, +, -, *, /\} \subseteq \Sigma$
 $\Sigma = T \cup V, S = \{E\}$
 Production :
 $\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '+' \langle E \rangle$
 $\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '-' \langle E \rangle$
 $\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '*' \langle E \rangle$
 $\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '/' \langle E \rangle$
 $\langle E \rangle ::= ' \text{Sin} (' \langle E \rangle ') '<T>$
 $\langle E \rangle ::= ' \text{Cos} (' \langle E \rangle ') '<T>$
 $\langle E \rangle ::= ' \text{Tan} (' \langle E \rangle ') '<T>$
 $\langle E \rangle ::= ' \text{Cot} (' \langle E \rangle ') '<T>$
 $\langle E \rangle ::= ' \text{Log} (' \langle E \rangle ') '<T>$
 $\langle E \rangle ::= ' \text{Sqrt} (' \langle E \rangle ') '<T>$
 $\langle E \rangle ::= ' \text{Abs} (' \langle E \rangle ') '<T>$
 $\langle T \rangle ::= '+' \langle E \rangle \mid '-' \langle E \rangle \mid '*' \langle E \rangle \mid '/' \langle E \rangle \mid \langle E \rangle$
 $\langle C \rangle ::= \langle \text{Var} \rangle \mid \langle \text{Num} \rangle \langle \text{Var} \rangle \mid \langle \text{Num} \rangle$
 $\langle \text{Var} \rangle ::= 'x'$
 $\langle \text{Num} \rangle ::= '-' ? \langle \text{Digit} \rangle + ('.' \langle \text{Digit} \rangle +)$
 $\langle \text{Digit} \rangle ::= ['0'-'9']$

3) *Generating Mathematical Expressions:* Based on the proposed method, it is necessary to generate mathematical expressions using the grammar. Generating phrases should be such that the numbered rules are chosen based on the message data. It is also possible to include a part of the data in numbers that are assumed as a coefficient in the mathematical expressions. The methodology for generating mathematical expressions in accordance with the proposed methodology is presented below.

Generating AST via Grammar

The binary tree is a suitable data structure that supports the inclusion of algebraic operators and single parameter functions. It provides a simple way to represent operator precedence. Besides, it is easy to convert the tree structure to other data formats for the requirements of document formatters. Another advantage is about the development of formal grammars because each node of the tree suggests a recursive invocation among parent and child ones constructed by a grammar rule.

Figure 2 shows a block diagram of mathematical components required to create a mathematical expression using trees.

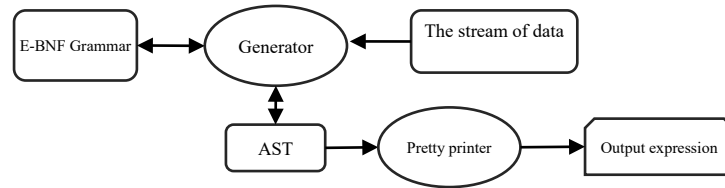


Figure 2. The methodological components for tree-based generation of expressions

In Figure 2, The "Generator" first places the beginning rule of a grammar into an AST and then recursively expands the non-terminals in that rule replacing them with the other rules according to input data.

Note that the rules presented in List do not consider the precedence of operators because it is not matter for the proposed method. List 3 displays the main algorithm of the methodology performed by the Generator component of Figure 2.

List 3. The expression-generating algorithm

```

AST ← Start symbol E
While exists any data in input stream
  N ← Get a data from stream
  expr ← Select Nth rule
  AST ← Replace E with expr in AST
In-order traverse the AST and print mathematical expression
  
```

The mathematical expressions generated using the method presented in List 3 are distributed uniformly and based on input data. Mathematical expressions that are commonly used in resources have different distributions. For example, there are usually more operators than the Cot function in the expressions. Stochastic Grammars [20] can be used to control the status of the invoked rules. Initializing an invocation probability for each rule in the algorithm, controlled through the expression steps, we can create mathematical expressions that are more realistic. In List 4, the grammar of List 2is represented by hypothetical possibilities.

List 4. A stochastic grammar with probabilities placed next to each production rule

-
1. $\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '+' \langle E \rangle \quad (.17)$
 2. $\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '-' \langle E \rangle \quad (.17)$
 3. $\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '*' \langle E \rangle \quad (.12)$
 4. $\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '/' \langle E \rangle \quad (.12)$
 5. $\langle E \rangle ::= 'Sin (' \langle E \rangle ')' \langle T \rangle \quad (.06)$
 6. $\langle E \rangle ::= 'Cos (' \langle E \rangle ')' \langle T \rangle \quad (.06)$
 7. $\langle E \rangle ::= 'Tan (' \langle E \rangle ')' \langle T \rangle \quad (.05)$
 8. $\langle E \rangle ::= 'Cot (' \langle E \rangle ')' \langle T \rangle \quad (.04)$
 9. $\langle E \rangle ::= 'Log (' \langle E \rangle ')' \langle T \rangle \quad (.05)$
 10. $\langle E \rangle ::= 'Sqrt (' \langle E \rangle ')' \langle T \rangle \quad (.10)$
 11. $\langle E \rangle ::= 'Abs (' \langle E \rangle ')' \langle T \rangle \quad (.06)$
 1. $\langle T \rangle ::= '+' \langle E \rangle \quad (.2)$
 2. $\langle T \rangle ::= '-' \langle E \rangle \quad (.2)$
 3. $\langle T \rangle ::= '*' \langle E \rangle \quad (.2)$
 4. $\langle T \rangle ::= '/' \langle E \rangle \quad (.2)$
 5. $\langle T \rangle ::= \langle E \rangle \quad (.2)$
- $\langle C \rangle ::= \langle Var \rangle | \langle Num \rangle \langle Var \rangle$
 $\langle Var \rangle ::= 'x'$
 $\langle Num \rangle ::= '-' ? \langle Digit \rangle + ('.' \langle Digit \rangle +)?$
 $\langle Digit \rangle ::= ['0'-'9']$
-

Wayner has proposed a method for using probabilistic grammars using Huffman coding [12]. We can also act in the same way in our proposed method. For this purpose, we can consider the probability of each rule as the frequency of that rule and obtain a unique code by using the Huffman tree for each rule. List 5 shows the grammar of List 4 using the Huffman algorithm.

List 5. A stochastic grammar with Huffman code placed next to each production rule

1.	$\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '+' \langle E \rangle$	(000)
2.	$\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '-' \langle E \rangle$	(001)
3.	$\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '*' \langle E \rangle$	(010)
4.	$\langle E \rangle ::= \langle C \rangle '/' \langle E \rangle$	(011)
5.	$\langle E \rangle ::= 'Sin' (\langle E \rangle)'$	(1000)
6.	$\langle E \rangle ::= 'Cos' (\langle E \rangle)'$	(1001)
7.	$\langle E \rangle ::= 'Tan' (\langle E \rangle)'$	(1010)
8.	$\langle E \rangle ::= 'Cot' (\langle E \rangle)'$	(1100)
9.	$\langle E \rangle ::= 'Log' (\langle E \rangle)'$	(1101)
10.	$\langle E \rangle ::= 'Sqrt' (\langle E \rangle)'$	(111)
11.	$\langle E \rangle ::= 'Abs' (\langle E \rangle)'$	(1011)
1.	$\langle E' \rangle ::= '+' \langle E \rangle$	(00)
2.	$\langle E' \rangle ::= '-' \langle E \rangle$	(010)
3.	$\langle E' \rangle ::= '*' \langle E \rangle$	(011)
4.	$\langle E' \rangle ::= '/' \langle E \rangle$	(10)
5.	$\langle E' \rangle ::= \langle E \rangle$	(11)
	$\langle C \rangle ::= \langle Var \rangle \langle Num \rangle \langle Var \rangle \langle Num \rangle$	
	$\langle Var \rangle ::= 'x'$	
	$\langle Num \rangle ::= '-' ? \langle Digit \rangle + ('.' \langle Digit \rangle +)?$	
	$\langle Digit \rangle ::= ['0' - '9']$	

Expressions generated from the grammar of Table 5 will have a more realistic distribution. Of course, the grammatical probabilities must be determined depending on the covers which the mathematical expressions will be placed in. For this purpose, it is easy to calculate the probabilities by examining the actual mathematical expressions and determining the number of repetitions of each of the rules.

Representation of Mathematical Expressions

Similar to programming languages, there are various mathematical languages to describe mathematical expressions. Three most well-known mathematical languages are discussed below: MPL, MathML, and LaTeX. If the result of the syntax tree is a mathematical expression, e.g. derivation, then we will need to display it properly. AST has a tree form and therefore, it has to be converted into one of human-readable, LaTeX, or MathML form. Traversing AST in infix technique will allow us to get the proper terms to construct the desired output. Figure 3 shows the AST of $(3\cos(x+1))/2$.

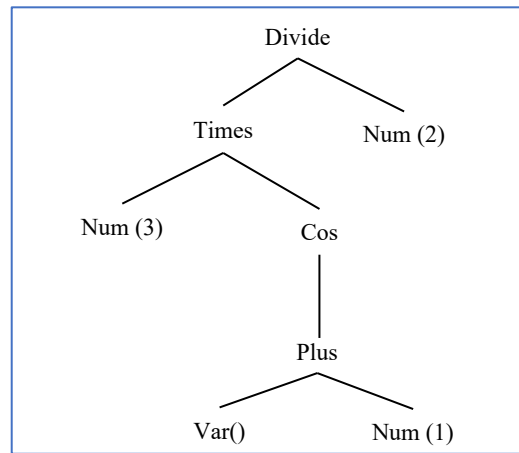


Figure 3. An example of a mathematical expression in AST

The result of infix traverse or simply syntax tree of Figure 3 is:

Divide (Times(Num(3), Cos(Plus(Var() , Num(1)))) , Num(2))

By applying output commands to each *class* in traversing code, required output format can be generated.

4) *Parsing and interpreting of Mathematical Expression:* For automatically generating parsers, there are many different generator tools that can create source codes in various languages. Typically examples of these tools are YACC [16] and bison [21], for imperative languages, ml-yacc[22], and happy [23] for functional languages, JavaCup [24], and JavaCC [18] for object-oriented languages. They require a special type of grammar as input, and generate either LL(k) or LR (k) parsers. Therefore, after choosing a parser generator, a proper grammar must be described according to the specifications of that generator.

JavaCC is a java-based parser generator that generates a top-down parser. Top-down parsers or recursive decent parsers allow the use of more general grammars. The only limitation of these parsers is that left recursion is not allowed because this may lead to infinite recursion. Top-down parsers have a structure identical to the grammar specification and are thus easier to debug. Embedding user code to generated abstract syntax tree in a top-down parser is simple due to the easiest of passing arguments and values across the nodes of the parse tree.

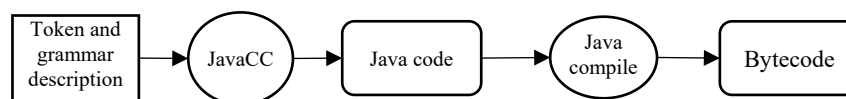


Figure 4. Parser generation with JavaCC

Converting Math Expression into AST

Converting a string into another model or data structure requires a converting process called translation. In an input string representing a mathematical expression, each operator has a rule that indicates the number of operands and the precedence of that operator to others. Such a translator which operates on mathematical expressions should keep these rules in a converted model, too.

The string form of mathematical expressions requires to be converted into mathematical tokens by a lexical analyzer. An example is shown below to demonstrate the input string and its token stream.

Table 1. Input string and its token stream

Input string	Token Stream
$3x^2+2(x-12)$	Num(3) Var Power Num(2) Plus Num(2) LPR Var Minus Num(12) RPR

In Table 1 the terms used to describe the token stream are for presentation purposes.

The token stream should be handled by mathematical rules which check if for example parentheses are in pair, and each operator has enough operand. These rules will be applied by a mathematical grammar.

The token stream will be analyzed to see whether it satisfies all rules defined by a mathematical grammar. According to the need, the syntax analyzer can report true or false for correct structure of the input stream, or generate a parse tree as an input to the next steps.

The parse tree is generated by a unit called parser. The leaves in the parse tree are terminals, and other nodes are non-terminals. However, it is appropriate to use another kind of tree called syntax tree. The main difference is that leaves are operands and nodes are operators. Besides, it offers a simple and efficient tree to work with mathematical expressions. The syntax tree is also called Abstract Syntax Tree or shortly AST. Figure 5 shows the steps to generate AST from an input string as a mathematical expression.

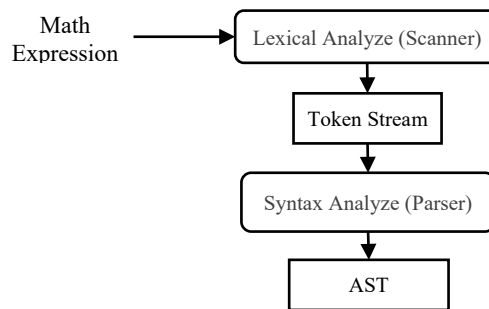


Figure 5. The steps to generate AST

Type inconsistency does not occur in mathematical expressions. Therefore, we will not use a semantic analyzer. Compiler-compiler tools can be used for convenience. Figure 6 demonstrates the steps required to produce the AST for our mathematical grammar using compiler-compiler tools.

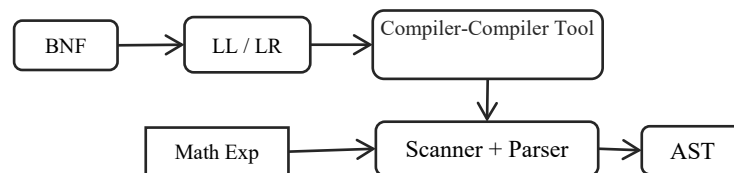


Figure 6. The steps required to produce the AST for the mathematical grammar

C. Embedding Message

In this section, the proposed method will be described. One of the parts of the steganography is to insert a message in a cover. Since the proposed method is a kind of cover generation, the message should be converted

into a cover of the type of mathematical expression. For this purpose, we will use the production method as presented in the previous section. Figure 7 shows the steps of the proposed methodology.

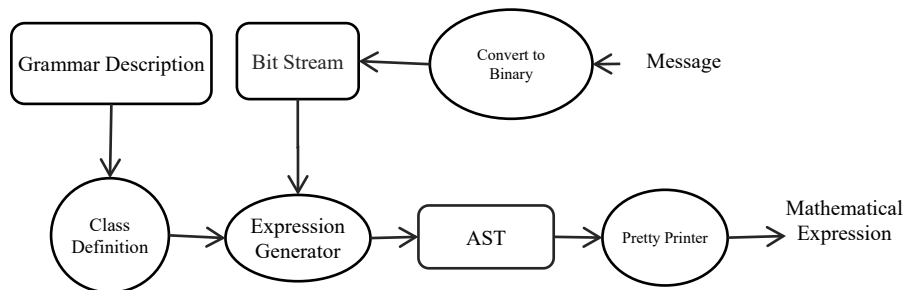


Figure 7. Components of the proposed methodology

As mentioned in the section on generating mathematical expressions, to generate mathematical expressions, you need an input through which the rules are selected for production. This entry is provided via the bit stream that is created from the message. Also, to increase the capacity of an insert message in a mathematical expression, instead of using the *Num* \rightarrow *Digit* rule, we can use a 3 or 4 bit number directly. Bits taken from the input are evaluated in sequence and selected by the Huffman codes assigned to each desired grammar rule. In cases where the rule has non-terminal *Num*, another part of the input is used as *Num* at the rule. This operation is repeated until all the input bits are completed. The Embedding algorithm is as List 6:

List 6. The embedding of a message

Convert message into binary as input bit stream
 $AST \leftarrow$ start symbol E
 While exists any data in *input stream*
 $expr \leftarrow$ Select a rule according to bits in stream and Huffman codes of rules
 if exist T rule then
 get 2 or 3 bit of stream, select a rule and replace it with T
 if exist Num in rule then
 get another 4 bit of stream and replace it with Num
 $AST \leftarrow$ Apply $expr$ in AST
 Represent AST as mathematical expression

D. Extracting Message

A grammar-based methodology to parsing and extracting the message from mathematical expressions is proposed. A multi-party system is used to perform required operation for the proposed methodology. Input data is parsed using an extended grammar for a mathematical expression. The output of the parser is a tree data structure where it models the input data in a way that it can be used for data extracting. Each node of this tree represents a symbol or part of the input data, and its connection with other symbols where symbols can be operators, numbers, etc. The steps of our methodology are shown in Figure 8.

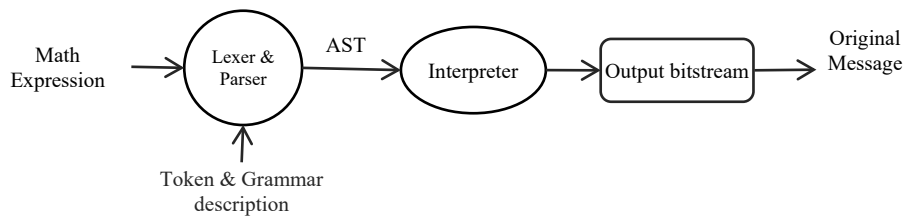


Figure 8. Phases and steps of the proposed methodology

Using these steps, one can implement a framework to work and extract the message from mathematical expressions. The operation of extraction of message bits can also be done at the time of AST production. In this case, at the time of parsing, when the parsing tree is created, in accordance with the rule used in the grammar, the corresponding Huffman code is extracted. There are several ways to create AST, one of which is the use of the compiler-compiler tool. In this paper, as an example, *JavaCC* is used to generate AST. For this purpose, in accordance with the proposed grammar, functions are developed.

Within each method, the corresponding operation is performed on expressions, and the result is returned, which is a string. List 7 shows some of the methods in *JavaCC*.

List 7. Some JavaCC functions for string-based message extraction

```

string parse() : { string a; } {
  a = expr(x) (<EOF> | <EOL>) { return a; }
}
string expr() : { string a, b; } {
  a = coef() <PLUS> b = expr() { return "000"+binary(a)+b; }
  | a = coef() <MINUS> b = expr() { return "001"+binary(a)+b; }
  | a = coef() <MUL> b = expr() { return "010"+binary(a)+b; }
  | a = coef() <DIV> b = expr() { return "011"+binary(a)+b; }
  | <SIN><LPR> a=expr() <PPR><PLUS> b = expr()
  { return "1000"+"00"+a+b;}
  | <SIN><LPR> a=expr() <PPR><MINUS> b = expr()
  { return "1000"+"010"+a+b;}
  | <SIN><LPR> a=expr() <PPR><MUL> b = expr()
  { return "1000"+"011"+a+b;}
  ...
}
string coef() : { Token t; } {
  t = <NUMBER><X> { return t.image; }
  | <X> { return ""; }
}
  
```

The parse function output in Table 8 is a string of extracted bits. By splitting the string into 8-bit strings and converting each one to the number representing the ASCII code of the message, the message can be obtained.

III. EVALUATION and RESULTS

In this paper, the text or any type of data is converted into a mathematical expression using grammatical rules, and somehow the data is hidden by the cover generation method. To evaluate the efficiency of the proposed system, we have implemented the proposed method using the Java programming language. Based on the random

structure presented in the proposed schema, a different mathematical expression is generated to conceal a specified text in every execution time. **Table 2** shows the production samples for some of data in different performances.

Table 2. Some of sample texts and their production expressions

Secret Message	Generated Expression
steganography	$\tan(\cot(x + \sqrt{\cos \frac{x}{37} - x + x} + 13x - x) + 16x - x)$
	$\tan(\cot(x + 36 + \sqrt{\cos \frac{5x}{26} - x + 22}) + \frac{x}{21})$
Math steganography	$\left \sqrt{\frac{15x}{x} * \tan \frac{x}{17} + x * 19} - \frac{\cot(4x - \sqrt{16x * x * (7x - (x - x))})}{\frac{\log(\cos(\cot \frac{3x}{x} - \cot \frac{x}{33}))}{\cot \frac{\cos x}{x}}} + x \right $
	$\left \sqrt{\frac{15x}{\tan \frac{7x}{25} + 32 * \cos(7x * x)} + x} - \log\left(\frac{ 17x - x }{\sqrt{15x - \tan(\sqrt{x * x} + x) * x}}\right) + \frac{3x}{x} \right $
The weather is very good today	$\tan(13x + \log(\cot(\tan \sin(\log \sqrt{\frac{x}{31} + x} - \log(x * x) * \frac{4x}{27})))$
	$x - \left \frac{x}{\sqrt{\sqrt{10x * x} - \frac{\sqrt{\cos(x-21 *x)}}{26}}} + \sqrt{\cot \frac{\cot \sqrt{ x+38 * x}}{x} + x - (12x * 33)} \right $

The manufacturing samples given in Table 2 show that the proposed method is suitable for concealing a short text. If the text lengths are acceptable, the generated mathematical expressions look very natural. To test the capacity of the proposed method, we have experimented some of text instances in the implemented system and the results are shown in Table 3.

Table 3. Capacity analysis for some of sample texts and their production expressions

Secret Message Size	Generated expression size (average)	Capacity Ratio
13	112.3	11.58%
18	133.3	13.50%
30	78.2	38.63%
60	147.0	40.82%
90	162.2	55.49%
120	208.4	57.58%
Average (55.17)	140.233	39.342%

For each text sample, 10 executions were performed and their average capacity was given in Table 3. According to this table and compared with other methods of steganography, it is clear that the proposed capacity is significantly more than other methods. Table 4 compares the proposed method with some of the other methods.

Table 4. Comparing Capacity of the proposed method with some of other methods

Method	Stego Type	Capacity Ratio
Kashida Technique [25]	Text	1.22%
Diacritics Technique [26]	Text	3.27%
Ref [27]	Image	≈0.8bpp = 10%
Ref [28]	Image	≈1bpp = 12.5%
Proposed Method	Mathematical	39.34%

Despite the high ability offered by the proposed method in capacity, the main weakness of this approach is that it is only suitable for short text lengths. For longer-length text, it can be included in more mathematical expressions. One of the applications of this method is to hide private keys in cryptographic methods which must be securely transmitted short text as a key.

IV. DISCUSSION

This paper proposes a method for hiding text in mathematical expressions. In terms of the special structures of mathematical expressions, it is possible to produce mathematical expressions that are not doubtful, with a returnable methodology for the message. For this purpose, a suitable grammar is designed according to the proposed method. We transform the desired grammar into a probabilistic grammar, which can determine the probability of each rule depending on the type of the given mathematical expressions. In this way, we can examine a number of actual mathematical expressions with respect to the text.

To make the generated mathematical expressions more natural, we can define different classes. At production time, we can choose one of these classes randomly or under certain conditions. This issue is presented in the algorithm presented in the methodology in Figure 8. Table 5 shows a list of some supported forms that an algebraic expression can have.

Table 5. Various forms of covered expressions

Cover form	Cover form
exp	$f(x) = exp$
$f(exp) = exp$	$exp = exp$
$f(x) = exp = exp$	$f(exp) = exp = exp$
exp, exp	$f(x) = exp, exp$
$f(x)=exp, g(x)=exp$	$f(exp)=exp, g(x)=exp$
$f(exp)=exp, g(exp)=exp$	$exp=exp, exp=exp$
$f(x)=exp=exp, g(x)=exp=exp$	

By choosing some of these classes, the generated mathematical expressions look more natural, and the capacity of the inserted message can be increased. Other cases may also be considered for realizing mathematical expressions. For example, the generated expressions can also be converted to the forms shown in Table 6.

Table 6. Some forms of generated expressions

Expression form	Expression form
$\int exp dx$	$\lim_{x \rightarrow 0} exp$
$\iint exp dx dy$	$\oint exp dx$

The proposed method, as a cover generation method, transforms the message into a mathematical expression. This transformation, different from cryptography, can be regarded as a special kind of steganography named cover generation method, and can be proposed as a new method of steganography. Because the previous steganography methods do not use mathematical expressions as a cover, no steganalysis instances that examine the properties of mathematical expressions are developed. This can be considered as the strength of the proposed method because it can safely send messages through this type of data.

REFERENCES

- [1] Gupta, B.B., D. Agrawal, and S. Yamaguchi. Handbook of Research on Modern Cryptographic Solutions for Computer and Cyber Security. New York: IGI Global, 2016.
- [2] Bhattacharyya, S., I. Banerjee, and G. Sanyal. "A novel approach of secure text based steganography model using word mapping method (WMM)." International Journal of Computer and Information Engineering, 2010: Vol. 4, No. 2, pp.96–103.
- [3] Lockwood, Robert, and Curran Kevin. "Text based steganography." International Journal of Information Privacy, Security and Integrity 3-2 (2017): 134-153.
- [4] Li, J., C. YU, B.B. Gupta, and X. Ren. "Color image watermarking scheme based on quaternion Hadamard transform and Schur decomposition." Multimedia Tools and Applications, 1027: 1–17.
- [5] Balaji, R., and Naveen Garewal. "Secure data transmission using video Steganography." IEEE International Conference on Electro/Information Technology. 2011.
- [6] Nikam, G., A. Gupta, V. Kalal, and P. Waghmare. "A Survey of Video Steganography Techniques." Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET), 2017: 33-35.
- [7] Cuttnel, J.D., and K.W. Johnson. Physics, 4th ed., Wiley, New York. 4th. New York: Wiley, 1998.
- [8] Mishra, Shilpi, Yadav Virendra Kumar, Trivedi Munesh Chand, and ShrimaliTarun. "Audio Steganography Techniques: A Survey." Advances in Computer and Computational Sciences. Springer, 2018: 581-589.
- [9] Johnson, Neil F., and JajodiaSushil. "Steganalysis of images created using current steganography software." International Workshop on Information Hiding. Berlin, 1998.
- [10] Provos, Niels, and Honeyman Peter. "Hide and seek: An introduction to steganography." 2003. 32-44.
- [11] Czaplewski, Bartosz. "Current trends in the field of steganalysis and guidelines for constructions of new steganalysis schemes." PrzeglądTelekomunikacyjny+ WiadomościTelekomunikacyjne, 2017: 1121-1125.
- [12] Wayne, P. "Mimic functions." Cryptologia 16, no. 3 (Jul 1992): 193-214.
- [13] Chang, Ching-Yun, and Clark Stephen. "Linguistic Steganography Using Automatically Generated Paraphrases." In Human Language Technologies: The 2010 Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. 2010. 591-599.

- [14] Sampat, Vivek, S. Karmokar, J. Madia, K. Dave, and P. Toprani. "Audio Steganography using Dynamic Cover Generation." *IJCA Proceedings on National Conference on Advancement of Technologies*. 2012. 26-30.
- [15] Seifedine, Kadry, and Sara Nasr. "New Generating Technique for Image Steganography." *Lecture Notes on Software Engineering 1*, no. 2 (2013): 190-193.
- [16] Johnson, Stephen C. *Yacc: Yet another compiler-compiler*. Vol. 32. Murray Hill, NJ: Bell Laboratories, 1975.
- [17] Levine, John R., Mason Tony, and Brown Doug. *Lex&yacc*. O'Reilly Media, Inc., 1992.
- [18] Kodaganallur, Viswanathan. "Incorporating language processing into java applications: A JavaCC tutorial." *IEEE software* 21, no. 4 (2004): 70-77.
- [19] Ryan, Conor, O'Neill Michael, and Collins J. J. "Grammatical evolution: solving trigonometric identities." *proceedings of Mendel*, 1998.
- [20] Newmeyer, Frederick J. "Grammar is grammar and usage is usage." *Language* 79, no. 4 (2003): 682-707.
- [21] Donnelly, Charles, and Stallman Richard. "Bison. The YACC-compatible parser generator." 2000.
- [22] Earley, Jay. "An efficient context-free parsing algorithm." *Communications of the ACM*, 1970: 94-102.
- [23] Marlow, Simon, and Gill Andy. *Happy: The parser generator for haskell*. 2004. <https://www.haskell.org/happy/>.
- [24] Hudson, S. E. *JAVACUP: LALR parser generator for Java. User's manual*, GUVU Center, Georgia Institute of Technology, 1996.
- [25] Adnan Gutub, LahouariGhouti, Alaaeldin Amin, TalalAlkharobi, andMohammad K. Ibrahim, "Utilizing Extension Character 'Kashida' With PointedLetters For Arabic Text Digital Watermarking", *International Conference on Securityand Cryptography - SECRYPT*, Barcelona, Spain, July 28 - 31, 2007.
- [26] Abed, M. A., Awaideh, S. M., Elshafei, A. R. M., &Gutub, A. A. (2007, November). Arabic diacritics based steganography. In *Signal Processing and Communications, 2007. ICSPC 2007. IEEE International Conference on* (pp. 756-759). IEEE.
- [27] K. Qazanfari, R. Safabakhsh, A new steganography method which preserves histogram: Generalization of LSB++, *Information Sciences*, 277 (2014) 90-101.
- [28] K. Muhammad, J. Ahmad, N.U. Rehman, Z. Jan, M. Sajjad, *CISKA-LSB: color image steganography using stegokeydirected adaptive LSB substitution method*, *Multimedia Tools and Applications*, (2016) 1-30

Araştırma Makalesi - Research Article

Potansiyel MAO-B İnhibitörü Olarak Propargil Yan Zinciri İçeren Yeni Bileşiklerin Sentezi ve Karakterizasyonu

Derya Osmaniye^{1*}, Yusuf Özkay²

Geliş / Received: 29/01/2020

Revize / Revised: 09/09/2020

Kabul / Accepted: 26/11/2020

ÖZ

Bu çalışma kapsamında, propargil grubunun Monoaminoksidaz-B (MAO-B) enzimi üzerindeki potansiyel inhibitör etkinliği dikkate alınarak bazı yeni propargil grubu içeren bileşikler sentezlenmiştir. Sentez çalışmalarında, 2- klorobenzimidazol NaH varlığında propargil bromür ile reaksiyona sokulmuş bileşik 1 elde edilmiştir. Bileşik 1 çeşitli benzilamin türevleri ile potasyum karbonat katalizörlüğünde muamele edilerek sonuç ürünlerine (2a-2c) ulaşılmıştır. Elde edilen bileşiklerin yapıları ¹H-NMR ve ¹³C-NMR ve HRMS spektroskopik yöntemleri ile doğrulanmıştır. Sentezlenen bileşiklerin MAO enzimleri üzerindeki etkileri *in-vitro* şartlarda florimetrik yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan aktivite çalışmaları sonucunda sentezlenen bileşiklerin MAO enzimlerini değiştiren düzeylerde inhibe ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Propargil, Benzimidazol, NMR, Monoamin Oksidaz, Parkinson Hastalığı

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: dosmaniye@anadolu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-0499-436X>)
Anadolu Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Farmasötik Kimya Anabilim Dalı, 26470, Eskişehir, Türkiye

²İletişim: yozkay@anadolu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8815-153X>)
Anadolu Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Farmasötik Kimya Anabilim Dalı, 26470, Eskişehir, Türkiye

Synthesis and Characterization of New Compounds Including Propargyl Side Chain as Potential MAO-B Inhibitor

ABSTRACT

In this study, some new propargyl derivatives were synthesized considering potential monoamine oxidase-B (MAO-B) inhibition potency of propargyl moiety. In synthesis studies, 2-chlorobenzimidazole was reacted with propargyl bromide in the presence of NaH and compound 1 was obtained. Compound 1 was treated with various benzylamine derivatives and final products (2a-2c) were gained. Structures of obtained compounds were established by spectroscopic methods. Effects of the synthesized compounds against MAO enzymes were observed by using *in-vitro* fluorimetric method. Activity studies revealed that synthesis compounds inhibited MAO enzymes to different extends. .

Keywords- *Propargyl, Benzimidazole, NMR, Monoamine Oxydase, Parkinson's Disease*

I. INTRODUCTION

Neurodegenerative disorders (NDs), characterized by temporary and irreparable loss of neuronal cells thought of by the loss of neurons in the brain, represent one of the main causes of death in industrialized countries. Alzheimer's (AD), Parkinson (PD) diseases have attracted great attention among neurodegenerative diseases. The daily activities of individuals with PD disease, which is a neurological disorder, are gradually affected and the quality of life decreases gradually. The disease, which also has a large number of symptoms, is progressive. The affected basal ganglion region, in which the monoamine oxidase B (MAO-B) isoform is mainly responsible for the metabolism of dopamine, is associated with the pathology of this disease. Dopaminergic (DA-ergic) neurons in CNS, which are known to be involved in the control of a number of basic physiological functions including cognitive behavioral, neuroendocrine and motor systems, play an important role in the pathology of neurodegenerative diseases. MAO containing Cu^{2+} , Fe^{2+} and phospholipid is a binding enzyme. And thanks to their effects on the methylation of primary amine and secondary and tertiary amine, they are responsible for the main catalytic deamination of monoamines ($\text{R-CH}_2\text{NH}_2$). Amines catalyzed by the monoamine oxidase (MAO) enzyme family include endogenous amines containing many neurotransmitters, such as dopamine, epinephrine, tyramine, benzylamine, serotonin, norepinephrine and β -phenyl ethylamine. MAOs have two isoforms. These isoforms have different substrate and inhibitors. In the heterogeneous enzyme, the isoform which chorgiline inhibited more strongly was named as MAO-A. A selective inhibitor that affects another isoform called MAO-B is Selegiline [1-9].

Parkinsonism is a disease accompanied by tremor, rigidity, bradykinesia, akinesia and postural abnormalities as a clinical syndrome. Parkinson's disease, which has no radical treatment with drugs, was first described by James Parkinson in 1817 as a chronic progressive and degenerative disease of the central nervous system. James Parkinson described the disease as a pulsating paralysis. Parkinsonism is a complex table of symptoms due to cell loss in the motor nuclei of the brain base. What distinguish Parkinson's disease from other variants of parkinsonism are the differences on the pathological basis. These; dopaminergic neurons in substantia nigra are primarily degeneration of pigmented neurons in the brainstem and Lewy bodies detected in surviving cells. Parkinson's disease is the second most common neurodegenerative disease after Alzheimer's. It is effective in genetic factors in the emergence of the disease. Many recent clinical studies have shown that it is effective in the formation of diseases in genetic factors as well as environmental factors. Parkinson's disease starts on average at the age of 50-60 and continues progressively over a period of 10-20 years. Studies conducted in mayo clinic revealed that the risk of Parkinson's disease is 2% in men and 1.3% in women. The reason for this difference may be hormonal differences. In addition, environmental factors (especially pesticides used in agriculture), genetic factors and toxins are factors affecting Parkinson's disease in people. Parkinson's disease is a chronic idiopathic disease that develops as a result of the excessive decrease of the neurodilator dopamine in the basal ganglia (especially in the corpus striatum) due to the decreased number of nigrostriatal dopaminergic neurons in the brain. It is a relatively common neurological disease; USA. According to statistics, the number of new cases per year is approximately 20 per 100,000 people. [10-12].

In Parkinson's disease, the dopaminergic neurons of the extrapyramidal system decrease in dopamine level. The balance between the cholinergic and dopaminergic system is disrupted in favor of cholinergic activity. MAO inhibitor drugs are used in the treatment of Parkinson's disease as they increase the level of dopamine by inhibiting the MAO enzyme that oxidizes dopamine. MAOI containing the propargyl group is responsible for the deamination of dopamine, and preferably phenylethylamine and the like, which is responsible for about 80% of the activity of the MAO enzyme in the brain. It is thought to show antiparkinson activity by raising the level of dopamine in the brain and partly reducing the free oxygen radicals that are involved in the progression of Parkinson's disease. In the treatment of Parkinson's disease, drugs are applied in a certain order. As a rule, there is no need for medication in the early period, when the symptoms of the disease do not disturb the daily life. Selegiline, anticholinergic drugs or amantadine should be tried first in cases that are a little more advanced. If the patient is young or tremors are prominent, anticholinergic drugs are preferred to amantadine. If the disease has advanced and the disease cannot be rehabilitated with the two medicaments mentioned above, it is switched to levadopa or levadopa + dopa decarboxylase inhibitor combination. If necessary, however, MAO B inhibitor selegiline or KOMT inhibitor tolcapone is given. [13].

Selegiline is also thought to act by reducing free oxygen radicals that are involved in the progression of Parkinson's disease and are composed of dopamine. Hydrogen peroxide and oxygen radicals are formed at the dopaminergic nerve endings during oxidative deamination of dopamine with MAO. Reduced glutathione (GSH) is converted from GSH peroxidase tar to glutathione disulfide. Hydrogen peroxide and glutathione disulfide are oxidant stress factors leading to the destruction of dopaminergic tips. Selegiline's inhibition of MAOB reduces or eliminates oxidant stress as it slows down these reactions. It also prevents the dopamine from being taken back from the nerve end. It can be used alone for initial therapy in patients. In advanced cases, it is often used with levadopa and decarboxylase inhibitors. The most common side effects are nausea, dry mouth, hypotension, insomnia, confusion and live dreams.

In the current study, a new series containing propargyl side chains in the structure of the selective MAO-B inhibitor selegiline was synthesized to examine their activity against MAO enzyme isotypes to develop safer and stronger MAO-B inhibitors (Figure 1). Benzimidazole ring, which is known to be responsible for many activities, was preferred in the structure. It is also planned to develop a potent MAO inhibitor using benzylamine substituents, an endogenous amine already used as a substrate.

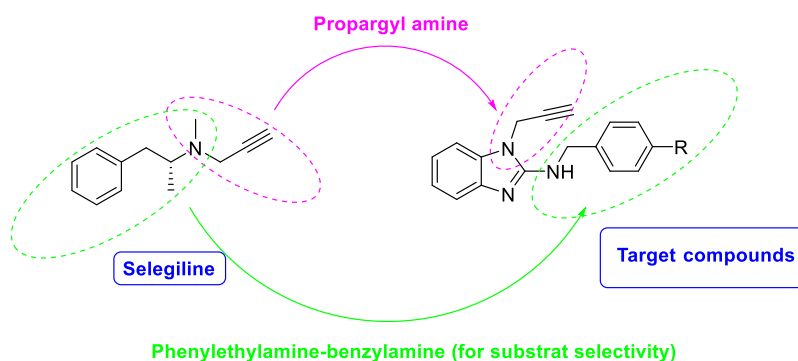


Figure 1. Design of target compounds

II. MATERIAL AND METHOD

A. Chemistry

All chemicals used in the synthesis studies were obtained from Merck Chemicals (Merck KGaA, Darmstadt, Germany) or Sigma-Aldrich Chemicals (Sigma-Aldrich Corp., St. Louis, Mo., USA). A Bruker 300 MHz and 75 MHz digital FT-NMR spectrometer (Bruker Bioscience, Billerica, MA, USA) in DMSO- d_6 , respectively recorded ^1H NMR and ^{13}C NMR spectra. In the NMR spectra splitting patterns were determined recognized as follows: s: singlet; d: doublet; t: triplet; td: triple doublet; m: multiplet. Coupling constants (J) are reported in units of Hertz (Hz). Mass spectra were recorded on an LCMS-IT-TOF (Shimadzu, Kyoto, Japan) by means of ESI method. Silica gel 60 F254 by TLC (Merck KGaA, Darmstadt, Germany) was used to control the purity of the obtained compounds.

Synthesis of 2-Chloro-1-(prop-2-yn-1-yl)-1H-benzo[d]imidazole (1): 2-Chlorobenzimidazole (5g, 0.0328 mol) dissolved in DMF (10 mL) was interacted with NaH (0.98g, 0.041). Propargyl bromide (6 mL, 0.3310 mol) was added to this mixture, where mixing of gas was completed for 5 minutes. The reaction content, which was continued for 30 hours at 25 °C, was poured into ice water, the product precipitated, filtered and washed with water, then dried and crystallized from ethanol.

Synthesis of 2-(4-Substitutedbenzylamino)-1-propargyl-1H-benzo[d]imidazole (2a-2c): 2-Chloro-1-(prop-2-yn-1-yl)-1H-benzo[d]imidazole (0.5 g, 0.0026 mol), the appropriate benzylamine derivative (0.00286mol) and potassium carbonate (0.0026mol, 0.3588g) were dissolved in DMF (5 mL). The final solution

content, which was stirred under reflux for 24 hours, was terminated by pouring it into ice water. The product taken up by filtration was washed with water, dried and crystallized from ethanol.

N-benzyl-1-(prop-2-yn-1-yl)-1H-benzo[d]imidazol-2-amine (2a) : [14] Yield: 81 %, FTIR (ATR, cm^{-1}): 3263 (N-H), 1635 (C=C), 734, 698. $^1\text{H-NMR}$ (300 MHz, $\text{DMSO-}d_6$): δ = 2.26 (1H, s, -CH), 2.26 (2H, s, methylene), 5.25 (2H, s, methylene), 7.02 (1H, t, $J=7.9$ Hz, -NH), 7.16 (1H, td, $J_1=0.9$ Hz, $J_2=7.7$ Hz, Benzimidazole-H), 7.27-7.34 (5H, m, Monosubstituebenzene), 7.47 (1H, d, $J=8.0$ Hz, Benzimidazole-H), 7.53 (1H, d, $J=0.9$ Hz, Benzimidazole-H), 7.70 (1H, d, $J=7.8$ Hz, Benzimidazole-H). $^{13}\text{C-NMR}$ (75 MHz, $\text{DMSO-}d_6$): δ = 31.34, 46.00, 72.29, 78.50, 103.06, 110.71, 117.74, 117.91, 122.21, 127.37, 128.04, 129.20, 137.74, 147.04, 152.34. HRMS (m/z): $[\text{M}+\text{H}]^+$ calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{15}\text{N}_3$: 262.1339; found: 262.1347.

N-(4-chlorobenzyl)-1-(prop-2-yn-1-yl)-1H-benzo[d]imidazol-2-amine (2b): Yield: 75 %, FTIR (ATR, cm^{-1}): 3321 (N-H), 1635 (C=C), 738. $^1\text{H-NMR}$ (300 MHz, $\text{DMSO-}d_6$): δ = 2.24 (1H, s, -CH-), 2.25 (2H, s, methylene), 5.24 (2H, s, methylene), 7.03 (1H, t, $J=7.6$ Hz, -NH), 7.16 (1H, td, $J_1=0.9$ Hz, $J_2=7.7$ Hz, Benzimidazole-H), 7.30 (2H, d, $J=8.5$ Hz, 1,4-Disubstituebenzene), 7.39 (2H, d, $J=8.5$ Hz, 1,4-Disubstituebenzene), 7.48 (1H, d, $J=8.0$ Hz, Benzimidazole-H), 7.53 (1H, d, $J=1.2$ Hz, Benzimidazole-H), 7.70 (1H, d, $J=7.8$ Hz, Benzimidazole-H). $^{13}\text{C-NMR}$ (75 MHz, $\text{DMSO-}d_6$): δ = 31.42, 45.35, 72.99, 79.20, 103.17, 110.72, 117.78, 117.99, 122.24, 129.18, 129.33, 132.69, 136.72, 147.02, 152.24. HRMS (m/z): $[\text{M}+\text{H}]^+$ calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{Cl}$: 296.0949; found: 296.0949.

N-(4-methoxybenzyl)-1-(prop-2-yn-1-yl)-1H-benzo[d]imidazol-2-amine (2c): Yield: 79 %, FTIR (ATR, cm^{-1}): 3140 (N-H), 1635 (C=C), 790. $^1\text{H-NMR}$ (300 MHz, $\text{DMSO-}d_6$): δ = 2.26 (1H, s, -CH-), 2.27 (2H, s, methylene), 3.70 (3H, s, -methoxy), 5.17 (2H, s, methylene), 6.89 (2H, d, $J=8.8$ Hz, 1,4-Disubstituebenzene), 7.01 (1H, t, $J=7.1$ Hz, -NH), 7.16 (1H, td, $J_1=1.1$ Hz, $J_2=7.3$ Hz, Benzimidazole-H), 7.26 (2H, d, $J=8.7$ Hz, 1,4-Disubstituebenzene), 7.47-7.50 (2H, m, Benzimidazole-H), 7.69 (1H, d, $J=7.7$ Hz, Benzimidazole-H). $^{13}\text{C-NMR}$ (75 MHz, $\text{DMSO-}d_6$): δ = 31.04, 45.56, 55.52, 73.52, 78.57, 102.96, 110.67, 114.54, 117.74, 117.85, 122.18, 128.96, 129.66, 147.07, 152.33, 159.16. HRMS (m/z): $[\text{M}+\text{H}]^+$ calcd for $\text{C}_{18}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{O}$: 292.1444; found: 292.1434.

B. MAO Inhibitory Assay

The effects of synthesis compounds on MAO-A and MAO-B enzymes were measured fluorimetrically in vitro using a microplate reader. Experiments were carried out in 96-well plates. Human MAO-A and MAO-B enzymes (Sigma-Aldrich, Germany) stock solutions were prepared in 0.1 M phosphate buffer at a concentration of 5 mg / mL. In fluorimetric measurements, MAO-A stock solution was used by diluting with buffer solution to 0.006 mg / mL and MAO B stock solution was diluted with buffer solution to 0.015 mg / mL. In enzymatic reactions, kynuramin stock solution was used as fluorimetric reagent at a concentration of 25 mM. In fluorimetric measurements, the kynuramin solution was used to dilute to 40 μM concentration with buffer solution for MAO-A activity, and the kynuramin solution was diluted with buffer solution to 20 μM concentration for MAO B activity. Test compounds were added to microplates at 8 μL dilution concentrations, using 2% DMSO. Incubation was carried out at 37 $^\circ\text{C}$ for 20 minutes by adding kynuramin (50 μL / well) and enzyme solution (50 μL / well) to the microplates. At the end of this period, 75 μL / well of 2N NaOH solution was used to terminate the reaction between MAO enzymes and kynuramin. Fluorescence values of wells were read at 310/380 (excitation / emission) nm with the help of microplate reader and IC_{50} values of the compounds were calculated [15-18].

III. RESULT AND DISCUSSION

A. Chemistry

In this study, we have synthesized new compounds, which possessed benzimidazole-propargyl moiety. The synthetic pathway was outlined in Figure-2. Firstly, 2-Chloro-1-(prop-2-yn-1-yl)-1H-benzo[d]imidazole (1) were obtained by reaction between 2-chlorobenzimidazole and propargyl bromide. Finally, target compounds (2a-2c) were obtained with the reaction between compounds 1 and benzyl amine derivatives. The final compounds were purified and their structures were characterized using spectroscopic methods ($^1\text{H-NMR}$, $^{13}\text{C-NMR}$ and HRMS). The $^1\text{H-NMR}$ spectra of compounds showed signals at 2.24-5.25 ppm for aliphatic protons.

N-H had peaks between 7.01 ppm and 7.03 ppm as triplet. In the ^{13}C NMR spectrum, aliphatic peaks belonging to substituents were observed between 31.04 ppm and 79.20 ppm. Aromatic carbons were gained between 102.95 ppm and 159.16 ppm. All masses were accorded with the estimated M+H values.

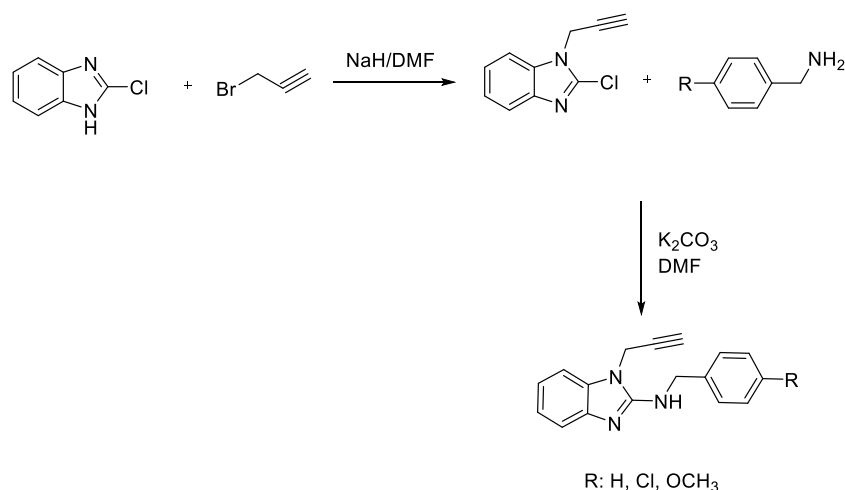


Figure 2. The Synthetic Pathway of the Compounds.

B. MAO Inhibitory Assay

In vitro studies were conducted to evaluate the *h*MAO-A and *h*MAO-B inhibitory activities of the compounds obtained. Selegiline and Moclobemide were used as reference compounds. The results obtained as % inhibition are presented in Table 1. In the context of *in vitro* activity studies, synthesized compounds were prepared at concentrations of 10^{-3} and 10^{-4} M, and the inhibition values of MAO A and MAO B were calculated.

Within the scope of this study, 3 compounds were synthesized, the benzimidazole-propargyl derivative. The effects of the resulting compounds on MAO-A and MAO-B enzymes were investigated by *in vitro* fluorimetric method. As a result of the activity studies, it has been determined that the compounds have lower activity potential compared to MAO-A reference drug moclobemide and MAO-B reference drug selegiline. It has a promising activity profile with 71% inhibition level, which is compound 2c among the compounds. At the same time, the effect results show that the variable groups in the structure contribute to the activity. The higher activity potential of the compounds on the MAO-B enzyme reveals the selectivity of the propargyl group on this enzyme. Some of the clinically prescribed MAOi drugs such as rasagiline and selegiline, are already known to carry the propargyl group in their chemical structures [19,20].

Generally, the compounds showed higher activity against *h*MAO-B than *h*MAO-A. The selective compounds against the MAO-B enzyme prove the affinity of the propargyl group to the MAO-B enzyme. The effects of propargyl group on MAO enzymes have been revealed in literature studies. This group interacts with the Phe208 amino acid in the active site. And it has been found to be more active against MAO-B [21-24]. In particular compounds 2b and 2c have a significant activity value against *h*MAO-B. Compounds 2b showed inhibition against *h*MAO-B with values of %61.75 at 1mM concentration. Compounds 2c showed inhibition against *h*MAO-B with values of %71.12 at 1mM concentration. It appears that the phenyl ring being nonsubstituted does not contribute to the activity. The substitution from the 4th position increases the activity. When the structures of these compounds are examined, it is seen that they carry electron donating group such as chloride and methoxy. The most active derivative, the compound 2c, inhibits the enzyme MAO-B by 71.12% at a concentration of 1mM, while inhibiting the enzyme MAO-A by 31.85%. In other words, it is approximately 2 times more selective against MAO-B enzyme. This rate is similar to that of selegiline.

Table 1. % Inhibition of Compounds 2a-2c and Reference drugs Against MAO enzymes

Compounds	R	% MAO-A Enzyme Inhibition		% MAO-B Enzyme Inhibition	
		0.1 mM	1 mM	0.1 mM	1 mM
2a	-H	19.31	34.29	46.63	55.27
2b	-Cl	24.65	32.44	52.44	61.75
2c	-OCH ₃	26.19	31.85	63.54	71.12
Selegiline	-	33.16	39.71	88.96	95.29
Moclobemide	-	68.14	81.23	18.61	23.09

IV. CONCLUSION

Within the scope of this study, 3 compounds have been synthesized from benzimidazole-propargyl derivative. ¹H and ¹³CNMR spectroscopy help was clarified about the structures of the compounds obtained. The effects of the resulting compounds on MAO-A and MAO-B enzymes were investigated by the *in vitro* fluorimetric method. As a result of the activity studies, it was determined that the compounds have a lower activity potential compared to reference drugs. However, compound 2c has a promising activity profile with 71.12% inhibition levels. In addition, the activity results show that variable groups in the structure contribute to the activity. The fact that the compounds have higher activity potential on the MAO-B enzyme reveals the effect of the propargyl group on this enzyme. These study results are shining light for future studies. In the light of the results obtained, the activity of the new compounds is interesting by changing the benzylamine residue. In addition, the fact that the benzimidazole ring is aromatic and the propargyl group in the compound of the selegiline is connected to an aliphatic structure overlap with each other. It is believed that the activity will increase in compounds where the propargyl amine group is less affected by the steric barrier. Additionally, the presence of an electron donor group in the benzylamine substituent increases the activity against the MAOs enzyme. The highest activity value is in the compound bearing the methoxy substituent. Compared to the chlorine atom, the electronegativity difference of the oxygen atom may have revealed this activity change.

REFERENCE

- [1] Zindo, F. T., Malan, S. F., Omoruyi, S. I., Enogieru, A. B., Ekpo, O. E., Joubert, J. (2019). Design, synthesis and evaluation of pentacycloundecane and hexacycloundecane propargylamine derivatives as multifunctional neuroprotective agents. *European journal of medicinal chemistry*, 163, 83-94.
- [2] Kumar, B., Kumar, V., Prashar, V., Saini, S., Dwivedi, A. R., Bajaj, B., Mehta, D., Parkash, J., Kumar, V. (2019). Dipropargyl substituted diphenylpyrimidines as dual inhibitors of monoamine oxidase and acetylcholinesterase. *European journal of medicinal chemistry*, 177, 221-234.
- [3] Sasidharan, R., Baek, S. C., Leelabaiaamma, M. S., Kim, H., Mathew, B. (2018). Imidazole bearing chalcones as a new class of monoamine oxidase inhibitors. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 106, 8-13.
- [4] Szökő, É., Tábi, T., Riederer, P., Vécsei, L., Magyar, K. (2018). Pharmacological aspects of the neuroprotective effects of irreversible MAO-B inhibitors, selegiline and rasagiline, in Parkinson's disease. *Journal of Neural Transmission*, 125(11), 1735-1749.
- [5] Zhou, S., Chen, G., & Huang, G. (2018). Design, synthesis and biological evaluation of lazabemide derivatives as inhibitors of monoamine oxidase. *Bioorganic & medicinal chemistry*, 26(17), 4863-4870.
- [6] Finberg, J. P. (2019). Inhibitors of MAO-B and COMT: Their effects on brain dopamine levels and uses in Parkinson's disease. *Journal of Neural Transmission*, 126(4), 433-448.

- [7] Kumar, B., Kumar, M., Dwivedi, A. R., Kumar, V. (2018). Synthesis, Biological Evaluation and Molecular Modeling Studies of Propargyl-Containing 2, 4, 6-Trisubstituted Pyrimidine Derivatives as Potential Anti-Parkinson Agents. *ChemMedChem*, 13(7), 705-712.
- [8] Mathew, B., Parambi, D. G., Mathew, G. E., Uddin, M. S., Inasu, S. T., Kim, H., Marathakam, A., Unnikrishnan, M., Carradori, S. (2019). Emerging therapeutic potentials of dual-acting MAO and AChE inhibitors in Alzheimer's and Parkinson's diseases. *Archiv der Pharmazie*, 352(11), 1900177.
- [9] Tripathi, R. K. P., Ayyannan, S. R. (2019). Monoamine oxidase-B inhibitors as potential neurotherapeutic agents: An overview and update. *Medicinal research reviews*, 39(5), 1603-1706.
- [10] Cakmur, R. (2011). Parkinson hastalığı ve medikal tedavisi. *Klinik Gelişim*, 53-58.
- [11] Demirkiran, M., Jankovic, J. (1995). Paroxysmal dyskinesias: clinical features and classification. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society*, 38(4), 571-579.
- [12] Uzbay, T. (2007). *Nöropsikofarmakoloji: Rasyonel ilaç kullanımı*. Medikal Yayıncılık, İstanbul, 110-115.
- [13] Kayaalp, O. (2005). *Rasyonel Tedavi Yönünden Tıbbi Farmakoloji*. Hacettepe Taş Yayınları, Ankara, 913-918.
- [14] Mancuso, R., Veltri, L., Russo, P., Grasso, G., Cuocci, C., Romeo, R., Gabriele, B. (2018). Palladium-catalyzed carbonylative synthesis of functionalized benzimidazopyrimidinones. *Synthesis*, 50(02), 267-277.
- [15] Can, Ö. D., Osmaniye, D., Özkay, Ü. D., Sağlık, B. N., Levent, S., Ilgın, S., Baysal, M., Özkay, Y., Kaplancıklı, Z. A. (2017). MAO enzymes inhibitory activity of new benzimidazole derivatives including hydrazone and propargyl side chains. *European journal of medicinal chemistry*, 131, 92-106.
- [16] Can, N. Ö., Osmaniye, D., Levent, S., Sağlık, B. N., Korkut, B., Atlı, Ö., Özkay, Y., Kaplancıklı, Z. A. (2018). Design, synthesis and biological assessment of new thiazolylhydrazine derivatives as selective and reversible hMAO-A inhibitors. *European journal of medicinal chemistry*, 144, 68-81.
- [17] Ilgın, S., Osmaniye, D., Levent, S., Sağlık, B. N., Acar Çevik, U., Çavuşoğlu, B. K., Özkay, Y., Kaplancıklı, Z. A. (2017). Design and synthesis of new benzothiazole compounds as selective hMAO-B inhibitors. *Molecules*, 22(12), 2187.
- [18] Sağlık, B. N., Çavuşoğlu, B. K., Osmaniye, D., Levent, S., Çevik, U. A., Ilgın, S., Özkay, Y., Kaplancıklı, Z.A., Öztürk, Y. (2019). In vitro and in silico evaluation of new thiazole compounds as monoamine oxidase inhibitors. *Bioorganic chemistry*, 85, 97-108.
- [19] Youdim, M. B., Gross, A., & Finberg, J. P. (2001). Rasagiline [N-propargyl-1R (+)-aminoindan], a selective and potent inhibitor of mitochondrial monoamine oxidase B. *British journal of pharmacology*, 132(2), 500-506.
- [20] Knudsen Gerber, D. (2011). Selegiline and rasagiline: twins or distant cousins? Guidelines. *The Consultant Pharmacist*, 26(1), 48-51.
- [21] Chioua, M., González-Camuñas, A., Catarozzo, M. T., Alcaro, S., Ortuso, F., Yáñez, M., Marco-Contelles, J. (2019). Synthesis, Monoamine Oxidase Inhibition and Computational Analysis of Diversely Substituted N-Propargylated-1, 3, 5-triazines. *ChemistrySelect*, 4(28), 8334-8337.
- [22] Knez, D., Coletti, N., Iacovino, L. G., Sova, M., Pislari, A., Konc, J., Lesnik, S., Higgs, J., Kamecki, F., Mangialavori, I., Dolsak, A., Zakej, S., Tronteli, J., Kos, J., Binda, C., Marder, M., Dolsak, A. (2020). Stereoselective Activity of 1-Propargyl-4-styrylpiperidine-like Analogues That Can Discriminate between Monoamine Oxidase Isoforms A and B. *Journal of Medicinal Chemistry*, 63(3), 1361-1387.

- [23] Kumar, B., Kumar, M., Dwivedi, A. R., Kumar, V. (2018). Synthesis, Biological Evaluation and Molecular Modeling Studies of Propargyl-Containing 2, 4, 6-Trisubstituted Pyrimidine Derivatives as Potential Anti-Parkinson Agents. *ChemMedChem*, 13(7), 705-712.
- [24] Nag, S., Kettschau, G., Heinrich, T., Varrone, A., Lehmann, L., Gulyas, B., Thiele, A., Keller, E., Halldin, C. (2013). Synthesis and biological evaluation of novel propargyl amines as potential fluorine-18 labeled radioligands for detection of MAO-B activity. *Bioorganic & medicinal chemistry*, 21(1), 186-195.

Araştırma Makalesi - Research Article

GTGS Gerçekleme Problemleri İçin Akıllı Çözümlerin Endüstriyel Bir Robot Manipülatöre Uygulanması

Tolga Yüksel^{1*}

Geliş / Received: 31/01/2020

Revize / Revised: 20/07/2020

Kabul / Accepted: 20/07/2020

ÖZ

Görüntü-tabanlı görsel servolama (GTGS) duruş kestirimi gerektirmediğinden robot manipülatörler için popüler GS yaklaşımlarından biridir. GTGS teorik sorunların yanında gerçekleştirme sırasındaki sorunlarla da baş etmek zorundadır. Bu gerçekleştirme sorunlarından temel üç tanesi sırasıyla etkileşim matrisinin tersinin eldesi, kontrolör için uygun bir sabit kazanç değerinin tanımlanması ve özniteliklerin görüş alanı içinde tutulmasıdır. GTGS için etkileşim matrisi her ne kadar yalancı tersi ile beraber kullanılsa da tekilliklerin oluşması durumunda kontrol yasası işleyememektedir. Diğer bir taraftan sabit kazanç değeri yakınsama hızı ile uç işlevci hızları arasında bir ödünleşmeye sebep olmaktadır. GTGS işleyişi sırasında özniteliklerin görüş alanını terk edebilmesi de yaygın bir sorundur. Bu çalışmada bu sorunları çözmek için önerilen akıllı yaklaşımların endüstriyel tipte bir robot manipülatör üzerine uygulanması hedeflenmiştir. Uygulamanın ilk aşaması olarak akıllı yaklaşımçı birimler etkileşim matrisinin tersinin yerini almakta ve tekillik sorunu ortadan kalkmaktadır. İkinci aşama olarak sabit kazanç yerine her çevrimde hata ve hata türevinin değerine göre kazanç hesabı yapan bir bulanık mantık birimi kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise alınan görüntü düzleminde bölgeler tanımlanmış, bir bulanık mantık birimi yardımıyla özniteliklerin görüş alanı içerisinde kalması sağlanmıştır. Çalışmada tüm gerçeklemelere dair deneysel sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Görüntü Tabanlı Görsel Servolama, Robot Manipülatör, Bulanık Mantık, Yapay Sinir Ağı*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: tolga.yuksel@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4425-7513>)
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye

Implementation of Intelligent Solutions for IBVS Realization Problems to an Industrial Robot Manipulator

ABSTRACT

Image-based visual servoing (IBVS) is one of the popular VS approaches for robot manipulators since it does not require pose estimation. IBVS has to cope with theoretical problems as well as problems during implementation. The main three of these realization problems are obtaining the inverse of the interaction matrix, defining a suitable constant gain value for the controller, and keeping the features in the field of view, respectively. Although the interaction matrix for IBVS is used with the pseudoinverse, the control law does not work if singularities occur. On the other hand, the constant gain value causes a trade-off between the convergence speed and the end-effector speed. It is also a common problem that the features may leave the field of view during IBVS operation. In this study, it is aimed to implement the intelligent approaches proposed to solve these problems on an industrial type robot manipulator. As the first stage of the implementation, the intelligent approximation units take the place of the inverse of the interaction matrix and the problem of singularity disappears. As a second stage, instead of a fixed gain, a fuzzy logic unit which calculates gain according to the value of error and error derivative in each iteration is used. In the third stage, regions are defined in the image plane, and the features are kept within the field of view with the help of a fuzzy logic unit. In this study, experimental results of all implementations are presented and discussed.

Keywords- *Image Based Visual Servoing, Robot Manipulator, Fuzzy Logic, Artificial Neural Network*

I. GİRİŞ

Otomasyon sistemlerinde artan robot sayısı ile insana ait özelliklerin robotlara kazandırılmasında önemli aşamalar kaydedilmiştir. Bu özelliklerden en önemli olanı görmedir. Robotlarda görsel geribesleme terimi ilk olarak Hill ve Park tarafından kullanılmış [1], daha sonra yerini görsel servolama (GS) terimine bırakmıştır [2]. GS görüntü işleme, robot kinematik kontrolü ve kontrol teorisi alanlarını bir araya getirmektedir. Kameranın robot manipülatör uç işlevcisi üzerine monte edildiği eldeki göz ve kameranın uç işlevcisini görecektir şekilde monte edildiği ele göz donanım konfigürasyonları ile GS robot manipülatörler yanında insansız hava araçlarına da uygulanabilir hale gelmiştir.

GS robot uç işlevcisinin 3B uzayda doğrusal ve açısal hızlarını belirlemek amacıyla yola çıkmaktadır. Bunun için öncelikle kamera görüntü düzleminde tanımlanan k öznitelikleri belirlenerek bir s öznitelik vektörü oluşturulmaktadır. Daha sonra istenen öznitelik vektörü (s^*) ile bu vektör arasındaki farktan yararlanarak bir hata vektörü oluşturulmaktadır. Öznitelikler nokta, çizgi ve daire vb. formlarda olabilmektedir [3]. Burada, öznitelik tabanlı GS yaklaşımlarının yanında çekirdek fonksiyonu tabanlı veya parlaklık tabanlı yaklaşımların da olduğu belirtilmelidir [4], [5]. GS için son adım olarak oluşturulan hata vektöründen yararlanarak bir kinematik hız kontrol yasası tanımlanmaktadır. Bu adımlar içinde GS iki ana tipe ayrılmaktadır. Görüntü tabanlı görsel servolama (GTGS) görüntüden elde edilen s özniteliklerini doğrudan kinematik kontrolcü tasarımı için kullanırken konum tabanlı görsel servolama (KTGS) s özniteliklerini robotun duruş kestirimi için kullanmaktadır [3]. Duruş kestiriminin getirdiği sorunlar ve GTGS'nin kalibrasyon hatalarına karşı gürbüzlüğü uygulamalarda GTGS'yi daha yaygın kılmaktadır. Bu çalışma bu üstünlüğünden dolayı GTGS'ya odaklanmıştır.

GTGS çalışmaları daha çok teori düzeyinde kaldığından özellikle farklı öznitelik çıkarma yöntemlerine [6]–[8], farklı kamera tipleri ve geometrilerine [9], GTGS ve KTGS yaklaşımlarının üstünlüklerini birleştiren melez GS yöntemlerine [10]–[12] odaklandığı görülmektedir. Endüstriyel bir GS uygulamasına bakıldığında ise bu yaklaşımlardan farklı olarak etkileşim matrisi yalancı tersi eldesi, uygun kazanç değeri atama ve öznitelikleri görüş alanı içinde tutma gibi problemlerin öne çıktığı görülmektedir. Etkileşim matrisi gerçek dünyadaki 3B bir noktanın doğrusal ve açısal hızlarının 2B görüntü düzlemine izdüşüm yaparak bu düzlemdeki hızlara ilişkisini ortaya koymaktadır. Bu matrisin boyutları öznitelikler tarafından belirlendiğinden kare matris her zaman mümkün olmamaktadır. GTGS, kontrol yasasını tanımlarken bu etkileşim matrisinin tersine ihtiyaç duyduğundan yalancı tersi kullanımı gerekmektedir. Yalancı tersinin eldesi ise bazı GS senaryolarında mümkün olmamakta ve tekilliğe sebep olmaktadır [13]. Yakınsamış bir etkileşim matrisi veya tersi bu probleme çözüm getirebilmektedir. Kumar and Behera stereo kameralı ele göz konfigürasyonuna sahip bir fazlalıklı robot manipülatör için kendinden organize haritaları (SOM) kullanarak etkileşim matrisine yakınsama elde etmişlerdir fakat eldeki göz konfigürasyonunu göz ardı etmişlerdir [14]. Kosmopoulos 6 serbestlik dereceli bir manipülatör için doğrusal bir öznitelik seti için en küçük kareler kestirimcisiyle etkileşim matrisine bir yakınsayıcı üretmeye çalışmıştır fakat yakınsayıcı sadece bir yörünge için tanımlanmıştır [15]. Zhong vd. ise yakınsama için ortak çalışan gürbüz Kalman filtresi ve Elman sinir ağı önermişlerdir fakat sistemin tanımladığı uç işlevci hızlarının gerçekçiliği göz ardı edilmiştir [16]. Goncalves vd. ise etkileşim matrisini kullanmadan robot hızlarını ters bulanık modelleyici ile modellemeye çalışmışlardır [17]. Çalışmalarında kullandıkları bulanık modelleyici kendinden öğrenme mekanizmasına sahip değildir ve sadece eldeki göz konfigürasyonu göz önünde bulundurulmuştur.

İkinci GS gerçekleştirme problemi olan uygun kazanç değerini atama GS'in öznitelik hatalarını sıfıra yakınsaması olarak tanımlanan yakınsama süresi veya çevrim sayısını doğrudan etkilemektedir. Büyük kazanç değerleri ile hızlı yakınsama sağlanırken uç işlevci hız limitlerinin aşılması olasıdır. Küçük kazanç değerleri ise yavaş yakınsamaya sebep olmaktadır. Kazanç değerinin öznitelik hatalarına göre uyarlanabilir olması hız limitleri içinde hızlı yakınsamayı sağlayabilecektir. Mansard ve Chaumette çalışmalarında melez bir GTGS-KTGS sistemi tasarlamış, GTGS'dan KTGS'ya yumuşak geçiş için uyarlanabilir bir kazanç tanımlamışlardır [18]. Çalışmada hız limitleri tanımlanmamıştır. Başka bir çalışmada Kermogant ve Chaumette öznitelik kümesine eldeki göz konfigürasyonlu kameradan alınan öznitelikleri, ele göz konfigürasyonlu kameradan alınan öznitelikleri ve robot sisteminin kısıtlarını eklemiş ve önerdikleri doğrusal karesel bir kontrolcüde uyarlanabilir kazançtan yararlanmışlardır [19].

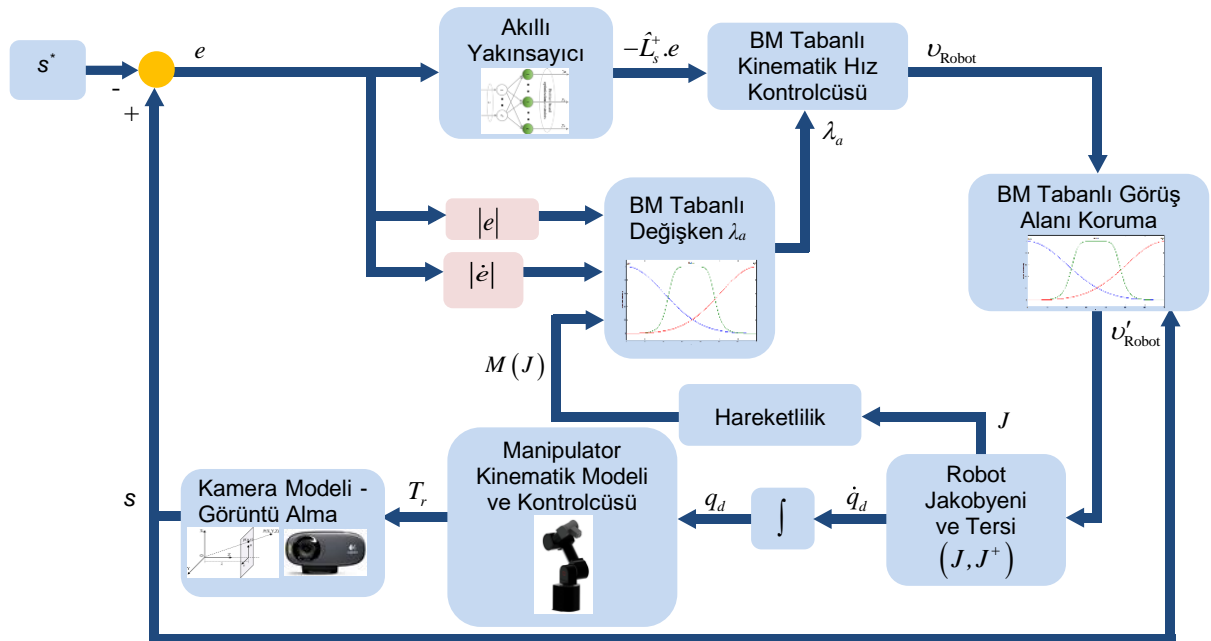
Son GS gerçekleştirme problemi olan özniteliklerin görüş alanından çıkması problemi ise GS sisteminin iraksamasına ve GS görevi sırasında ani hız değişimlerine sebep olmaktadır. Bu yıkıcı etkiden korunmak için Corke vd. öznitelikleri görüntü sınırlarından uzak tutacak bir diferansiyel potansiyel fonksiyon tanımlamışlardır [11]. Bu fonksiyonun sınır bölgede osilasyona sebep olabileceğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Chesi vd. ise özniteliklerin görüntü sınırına gelmesi durumunda uç işlevciyi 3B noktadan uzaklaştıracak bir hız kontrol yöntemi önermişlerdir [20]. Bu yöntem akılcı görünse de yakınsama süresinde uzamaya ve hız kontrol yöntemi değişikliğinin çatırtıya sebep olabileceği çalışmalarında belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise yukarıda bahsedilen bu üç probleme akıllı birimler kullanılarak ayrı ayrı çözümler sunulmuştur. İlk problem olan etkileşim matrisi tersi için akıllı yakınsayıcı temelli yaklaşım önerilmiştir. Bu öneride yapay sinir ağı (YSA), radyal tabanlı sinir ağı (RTA) ve ekstrem öğrenen makine (EÖM) kullanılmıştır. Bu üç akıllı birim klasik GTGS ile elde edilen yörüngelerin etkileşim matrisi yalancı tersleri ile eğitilmiş, elde edilen sonuçlar ortalama karesel hataya göre karşılaştırılmıştır. İkinci problemin çözümü için girişleri öznitelik hata ve hata türev vektörlerinin genlikleri olan bir bulanık mantık (BM) birimi tanımlanmıştır. Ayrıca Yoshikawa tarafından manipülatörlerin tekil konfigürasyondan uzaklıklarını bir nicelik olarak tanımladığı hareket uygunluğu da [21] manipülatör sistemini tekil konfigürasyonlardan uzak tutmak üzere BM girişi olarak tanımlanmıştır. Üçüncü problem için ise yine bir BM biriminin özniteliklerin görüntü sınırlarına uzaklıklarına göre hız kontrolcüsünde değişiklik yaptığı bir çözüm önerilmiştir. Bu üç çözüm önerisi eldeki göz konfigürasyonuna sahip bir endüstriyel tipte bir robot manipülatör üzerinde deneyerek sonuçlar bu çalışmada sunulmuştur.

Çalışma şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2’de GTGS gerçekleştirme problemleri için akıllı çözüm önerileri ayrıntılandırılmıştır. Bölüm 3’te deney düzeneği anlatılmış ve deneysel sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur. Son bölümde ise önerilen çözümler elde edilen deney sonuçlarıyla beraber tartışılmıştır.

II. ÖNERİLEN AKILLI GTGS SİSTEMİ

Önerilen sistemin genel gösterilimi Şekil 1’de verilmiştir.

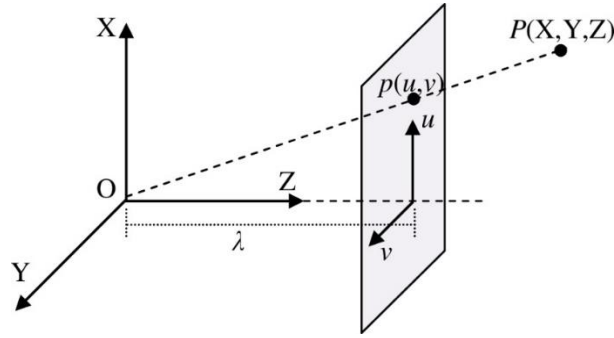


Şekil 1. Önerilen akıllı GTGS sistemi

Önerilen sistemin ilk adımını görüntü alma ve görüntü bozulmalarının (distorsiyon) giderilmesi oluşturmaktadır. Kullanılan kameraya bağlı olarak alınan görüntüde oluşacak bozulmalar çıkarılacak görüntü özneliklerinde değişikliğe sebep olabilir. Örneğin 3B dünyadaki nokta şeklinde bir özneliğin görüntü düzlemine izdüşümü kameradaki görüntü bozulmalarından dolayı etkilenecektir. Bu sebeple kameranın GS çevrimine sokmadan önce mutlaka kalibre edilmesi gerekmektedir. Bunun için bir satranç tahtası görseli ile kameraya belli mesafelerden belirli dönmeler ve farklı perspektiflerle görüntü alınarak bu görüntü üzerinde satranç tahtasındaki kare köşe noktaları belirlenerek kamera matrisi elde edilmeli, elde edilen kamera matrisine dair parametrelerde görüntüde düzeltme yapılmalıdır. Önerilen sistemin ilk adımında kullanılan kamera görüntüsünde bu düzeltme işlemleri yapılmıştır.

Alınan görüntüden nokta şeklinde öznelik çıkarımı sistemin ikinci adımını oluşturmaktadır. Bu adım için 3 adet nokta için öznelik çıkartılması uygun görülmüştür. Burada 6 serbestlik dereceli bir robot manipülatör için en az 3 noktaya dair öznelik gerektiği belirtilmelidir [3].

Önerilen sistemde akıllı bir yakınsayıcı ile etkileşim matrisine yakınsama önerilmiştir. Etkileşim matrisinin analitik eldesi için nokta şeklindeki öznelikler için iğne deliği modeli ile kamera çerçevesine göre 3B bir noktanın koordinatları belirtildiğinde ($P(X, Y, Z)$), bu noktanın görüntü çerçevesine göre durumu Şekil 2 ile gösterilmiştir.



Şekil 2. İğne deliği kamera modeli

Gerekli ara adımlardan sonra [3] nokta şeklindeki öznelikle görüntü düzlemindeki izdüşümün hızları arasındaki ilişki (1) ile verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{Z} & 0 & \frac{u}{Z} & \frac{uv}{\lambda} & -\frac{\lambda^2+u^2}{\lambda} & v \\ 0 & -\frac{\lambda}{Z} & \frac{v}{Z} & \frac{\lambda^2+v^2}{\lambda} & -\frac{uv}{\lambda} & -u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = L_s \cdot v_K \quad (1)$$

Burada Z , P noktasının derinliğidir ve her zaman elde edilemeyebilir. Bu sebeple L_s yerine \hat{L}_s kestirimi kullanılabilir. Bu kestirimdeki Z yerine ya istenen bir değer ya da s^* durumundaki Z değeri kullanılır. Yukarıdaki eşitlik sadece bir nokta özneliğe aittir ve her bir öznelik noktası için ayrı ayrı elde edilmelidir. Buradan yola çıkarak her bir öznelik noktasının etkileşim matrisinin satır sayısını 2 arttırdığı söylenebilir.

Öznelik hatalarının üstel azalması için sisteme kontrol sinyali olarak hızı vermek üzere aşağıdaki kontrolcü tasarım adımı izlenir [3]:

$$\dot{e} + \lambda \cdot e = 0 \Rightarrow \dot{e} = -\lambda \cdot e \Rightarrow L_s \cdot v_K = -\lambda \cdot e \Rightarrow v_K = -\lambda \cdot L_s^+ \cdot e \quad (2)$$

Burada L_s^+ etkileşim matrisinin yalancı tersi, λ ise kazanç değeridir. (1) ile verilen etkileşim matrisinin analitik tanımlı yalancı tersinde oluşabilecek tekillikler [13] yerine önerilen sistemde akıllı bir yakınsayıcı ile

etkileşim matrisine yakınsama önerilmiştir. Burada doğrudan etkileşim matrisine yakınsamanın getirdiği bir zayıflıktan bahsetmek gerekmektedir. Etkileşim matrisinin boyutu $L_s \in \mathbb{R}^{k \times 6}$ ile tanımlandığından öznitelik sayısına göre yakınsayıcı çıkışı tekrar ayarlanmalıdır. Bunun yerine $-\hat{L}_s^+ \cdot e$ değerine yakınsamak sabit sayıda çıkışı sağlamaktadır. Burada ağ girişi her bir öznitelige dair hata vektörü olacaktır. Ağdan beklenen ise kestirilmiş etkileşim matrisi tersi ile hata vektörü çarpımının oluşturduğu fonksiyona yakınsamasıdır. Bu sayede öznitelik nokta sayısı ile değişen etkileşim matrisi eleman sayısı yerine öznitelik nokta sayısından bağımsız, sadece doğrusal ve açılabilir hızlara etkiyen 6 çıkış bulunmuştur.

Sistemde akıllı yakınsayıcı olarak uygun sayıda nörona sahip YSA, RTA ve EÖM kullanılmıştır. Bu ağların eğitimi için klasik GTGS (sabit kazanç varken ve görüş alanı koruması olmadan) ile farklı başlangıç konum ve duruşlarında farklı başlangıç öznitelikleri için elde edilen veriler alınmış ve eğitim için kullanılmıştır.

Pratik GS uygulamalarında her ne kadar başarımlı kriteri olarak yakınsama hızı alınsa da endüstriyel uygulamalarda önem taşıyan hız limitleri göz ardı edilmektedir. Kontrol edilen bir robot manipülatörden istenen üretim hattında daha fazla iş yapabilmesidir. Bunu sağlayabilmek için GS'nın hız limitleri içinde daha hızlı yakınsaması sağlanmalıdır. Robot manipülatörün yeteneklerine bağlı bu hız limitleri içinde daha hızlı yakınsama için zamanla değişen bir kazanç değeri tanımlanmalıdır. Bu tanımlamada özellikle kazanç çizgeleme çalışmalarında etkin olarak kullanılan BM'dan yararlanılabilir [22]. Önerilen sistemde hata ve hata türevine ait norm değerlerini ($\|e\|, \|\dot{e}\|$) giriş olarak alan olan bir BM birimi uyarlanabilir λ_a çıkışını vermektedir. Bu çıkış değeri de BM tabanlı GS kinematik hız kontrolcüsüne aktarılmaktadır.

Değişen λ_a değeri hız profillerini değiştirirken robot manipülatörlerin endüstriyel uygulamalarında önemli olan başka bir terim de önerilen sistemde göz önünde bulundurulmuştur. Robot manipülatörler için yörünge planlaması yapan çalışmalarda eklem sınırları ve çarpışmadan kaçınma koşulları önemli kısıtlardır. GS yaklaşımını bir yörünge planlama görevi olarak düşünen çalışmalar ilke olarak önce yörünge türetilmesi ile ilgilenir [23], [24]. Bu türetim için ise homografi tabanlı hareket planlama gerekir. GTGS için hareket planlama yapılması proje kapsamı dışındadır fakat manipülatör hareketlerindeki bir kısıt olan hareketlilik önerilen sistemde göz önünde bulundurulmuştur. Hareketlilik, hız sınırlarının, herhangi rasgele bir duruşta hareket etme kabiliyetinin ve tekillikten kaçınmanın global bir ölçütüdür ve değeri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$M = \sqrt{\det(J(q) \cdot J(q)^T)} \quad (3)$$

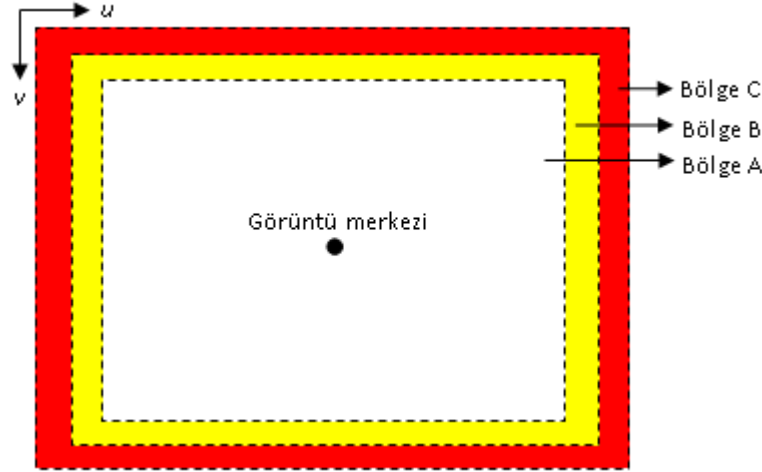
Yukarıdaki formülde $J(q)$ robot jakobyenini tanımlamaktadır. Bu sebeple önerilen sistemde uç işlevcisi hızları bulduktan sonra robot jakobyeni her bir çevrimde bulunarak hareketlilik hesabı için kullanılmaktadır. (3) ile tanımlı ölçüt önerilen sistemde değişen kazanç ile birlikte yüksek hızlarla hızlı yakınsama sağlanırken robot hareketi hakkında bilgi sağlayarak hız sınırlandırmaya yardımcı olması hedeflenmiştir. Şekil 1'de gösterildiği üzere bu ölçüt terimi de BM birimi girişi olarak bulunmaktadır. BM biriminin kuralları ve üyelik fonksiyonları tanımlanırken hız sınırları üzerindeki etkileri de göz önünde bulundurulmuştur.

Görüş alanı koruma için ise öncelikle görüntü içinde bölge tanımlamaları yapılmış ve bu tanıma ait gösterilim Şekil 3'te verilmiştir. Bu bölgeler sayesinde öznitelikler görüntü kenarına gelmeden gerekli önlemler alınabilmiştir. Literatürde bu gibi durumlarda önlem olarak öznitelikleri görüntü merkezine doğru yönlendirmek için hedef özniteliklerden uzaklaşarak onları görüntü merkezine sürükleyen $-Z$ yönünde bir hareket önerilmiştir [20]. Bu yaklaşım uygun bir yaklaşım gibi görünse de hedeften uzaklaşıldığı için yakınsama zamanını uzatmaktadır. Ayrıca bu ani manevra, hız işaretlerinde çatırtıya sebep olabilir. Önerilen sistemde bu yaklaşımın yerine yaklaşılacak kenara ait doğrusal hız bileşenine (v_x veya v_y) negatif bir hız etkisi eklenerek özniteliklerin görüntü merkezine yönlendirilmesi sağlanmaktadır.

Sistem için tanımlanan üç bölgede aşağıdaki durumlar tanımlanmıştır:

- Eğer özniteliklerden hepsi Bölge A içinde ise Şekil 3'da gösterilen Bölge A güvenli bölge sayıldığından hız bileşenleri GTGS tarafından belirlendiği halde kalmalıdır.
- Eğer özniteliklerden herhangi biri Bölge B'ye geçiş yaptıysa nokta özniteliğin giriş yaptığı kenara ait negatif bir doğrusal hız bileşeni belirlenecek ve mevcut doğrusal hıza eklenmelidir. Bu hız değişimini

yumuşak geçişle sağlayacak bir birime ihtiyaç duyulmaktadır. Önerilen sistem bu amaçla yine bir BM birimine başvurmaktadır. Bu birim, giriş olarak kenara en yakın özniteliğin koordinatlarını almakta, Şekil



Şekil 3. Görüş alanını korumak için görüntü bölge tanımları

3'deki Bölge B için negatif hız değerini oluşturarak mevcut hıza eklemektedir. Elde edilen hız vektörü olarak adlandırılarak robot manipülatöre dair hız vektörü tamamlanmış olmaktadır.

- Eğer özniteliklerden biri Bölge C'ye geçiş yaptıysa özniteliğin yaklaştığı kenara ait uygulanabilecek en büyük negatif hız mevcut hıza eklenmektedir.

Elde edilen uç işlevci hızları, robot jakobyeni ve tersi kullanılarak eklem hızları elde edilmekte ve robot iç dinamik kontrolcüsüne aktarılmaktadır. Kontrolcü içindeki bağımsız eklem PID kontrolcü sayesinde iç dinamik kontrolü sağlanmaktadır. Bu kontrolle beraber hareket eden uç işlevci-kamera ile yeni görüntü çerçevesi alınmakta, alınan görüntüden yeni öznitelikler elde edilerek GS kapalı çevrimi tamamlanmaktadır.

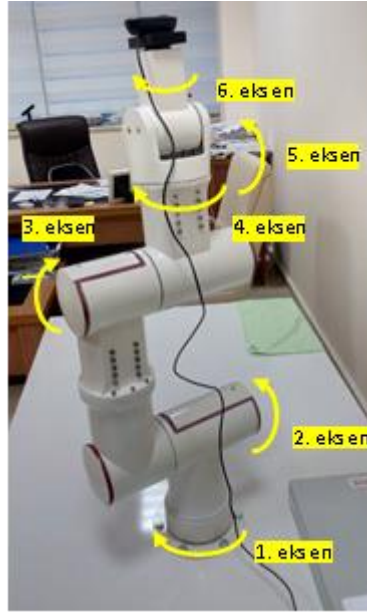
III. DENEYSEL SONUÇLAR

Önerilen akıllı GTGS sisteminde kullanılan Acrobot isimli robot manipülatör ACROME firması tarafından geliştirilmiş olup 6 döner eklemlilik, ± 0.1 mm hassasiyete, tam açık durumda 760 mm uzunluğa ve 1 kg yük taşıma kapasitesine sahip bir robot manipülatördür. Robot manipülatörün her bir eklemindeki Dynamixel PRO serisi akıllı servo motorlar fırçasız veya çekirdeksiz DA motor, redüktör ve sürücüyü bir araya getirmekte, bu sayede sadece USB ve güç bağlantısıyla doğrudan programlamaya izin vermektedir. Acrobot eklemlerinde Dynamixel Pro L54, H54 ve M42 serisi motorlar bulunmaktadır. Manipülatörün sabitlenmiş görüntüsü, eklem dönüş yönleri ve uç işlevciye bağlanmış olan Logitech C310 kamera Şekil 4'te gösterilmektedir. Robota dair DH parametreleri ise Tablo 1'de verilmektedir.

Önerilen sistemde yazılım ortamı olarak MATLAB-Simulink (R2017b) Camera Calibration Toolbox, Robotics Toolbox 9.0, Neural Network Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox ve NI LabVIEW 2018, NI Dynamixel API, NI Vision for LabVIEW, NI IMAQ VI, NI Vision Acquisition Express VI yazılımlarından yararlanılmıştır. Önerilen sisteme ait yazılımlar Core i5 işlemcili 8 GB RAM, GTX 1050 Ti ekran kartına sahip bir masaüstü bilgisayar kullanılarak hazırlanmıştır.

Kamera parametrelerinin çıkarımı için önce bir satranç tahtası şeklinde bir görüntü oluşturulmuştur. Burada görüntü üzerindeki her bir karenin kenar uzunluğu parametre çıkarımı için gereklidir. Çalışmada kullanılan görüntüde her bir karenin kenar uzunluğu 24 mm'dir. Daha sonra Camera Calibration Toolbox tarafından tavsiye edildiği üzere kameraya sabit bir mesafeden farklı perspektiflerle görüntünün 10 farklı görüntüsü 1024x768 çözünürlükte alınmıştır. Görüntüdeki köşe noktalarının örnek görüntüler arasındaki karşılaştırması yapılarak Logitech CH310'a dair kamera parametreleri çıkarılmıştır. Elde edilen kamera

parametreleri Tablo 2’de verilmiş olup üretilen her bir kameranın bozulmalarının kendine has olduğu, elde edilen bu parametrelerin farklı bir CH310 kamerada farklı olacağı belirtilmelidir.



Şekil 4. Acrobot robot manipülâtör ve Logitech CH310 kamera

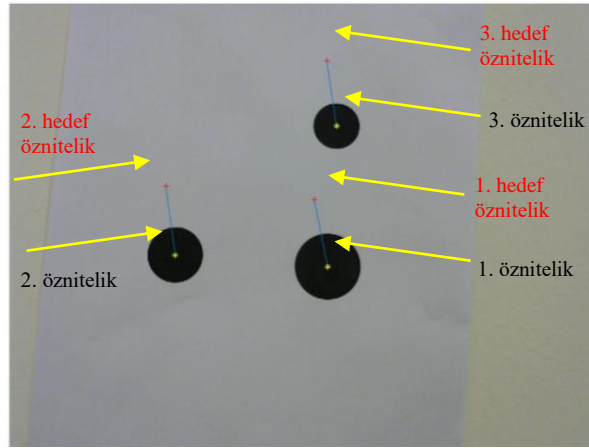
Tablo 1. Acrobot DH parametreleri

Eklem No	a (cm)	α	d (cm)	θ
1	0	$\pi/2$	17	θ_1
2	27.8	0	14	θ_2
3	0	$-\pi/2$	14	θ_3
4	0	$\pi/2$	14	θ_4
5	0	$-\pi/2$	0	θ_5
6	0	0	15	θ_6

Tablo 2. Logitech CH310 kamera parametreleri

Radyal Distorsiyon	[-0.1618 0.8119]
Tanjant Distorsiyon	[0 0]
İçsel(Intrinsic) Matris	$\begin{bmatrix} 1049.5 & 0 & 0; \\ 0 & 1048.5 & 0; \\ 490.7 & 378.8 & 1 \end{bmatrix}$
Odak Uzaklığı	[1049.5 1048.5]
Merkez Noktası Koordinatları	[490 378]

Projede hedef öznitelikler olarak nokta öznitelikler seçilmiştir. Nokta özniteliklerin kullanımındaki zorluk nokta özniteliklerin hedef özniteliklerle sürekli aynı şekilde eşleşmesini sağlamaktır [13]. Bu zorluğu aşmak için öznitelik olarak içi dolu üç farklı çaplarda daire oluşturulmuş ve bu dairelerin merkezleri nokta öznitelikler olarak seçilmiştir. Daire merkezlerinin bulunmasında görüntü alımından sonra 8’li piksel komşuluğu ile oluşan kapalı kontürlerin alanları bulunmuş, alan merkezleri ise toplam kontür piksel koordinatlarının kontür piksel sayısına bölümüyle elde edilmiştir [25]. Burada bu merkez piksellerin elde edilmesinde aydınlatma koşullarının oldukça etkili olduğu belirtilmeli, GTGS uygulamaları için çoğunlukla harici bir ışık kaynağı ile çalışma uzayının aydınlatılması gerektiği belirtilmelidir [3]. Öznitelik çıkarımına dair örnek bir görüntü mevcut (sarı*) ve hedef (kırmızı +) öznitelik gösterilimleriyle beraber Şekil 5’te verilmiştir. Burada deneyler boyunca kamera çözünürlüğünün 1280×960 seçildiği belirtilmelidir.



Şekil 5. Örnek kamera görüntüsü ve öznitelik gösterimleri

A. Klasik GTGS Sistemi Sonuçları

Önerilen sistemle karşılaştırma yapabilmek adına klasik GTGS sistemine dair bulgular öncelikle verilecektir. Örnek olarak (4)’teki hedef özniteliklere ($s^*(u, v)$) ve hedef özniteliklere dair robot eklem konum vektörüne (q^*) sahip, $\lambda = 0.5$ için klasik GTGS senaryo sonuçları Şekil 6’da verilmiştir. Burada başlangıç konum vektörünün ($q(0)$) Eş. (5)’de verildiği belirtilmelidir.

$$s^*(u, v) = \begin{bmatrix} 822 & 438 & 792 \\ 626 & 634 & 295 \end{bmatrix}$$

$$q^* = [-23.3 \quad -4.1 \quad -71.3 \quad 2.2 \quad 66.5 \quad -83.9]^\circ \quad (4)$$

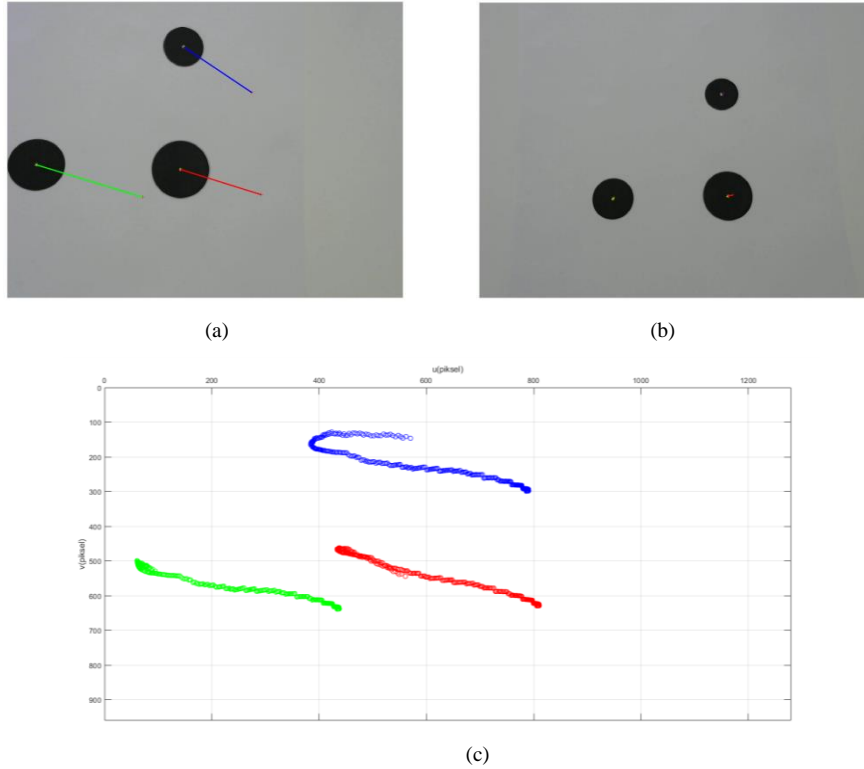
$$q(0) = [-21.7 \quad -32.1 \quad -71.3 \quad -7 \quad 65.5 \quad -82.9]^\circ \quad (5)$$

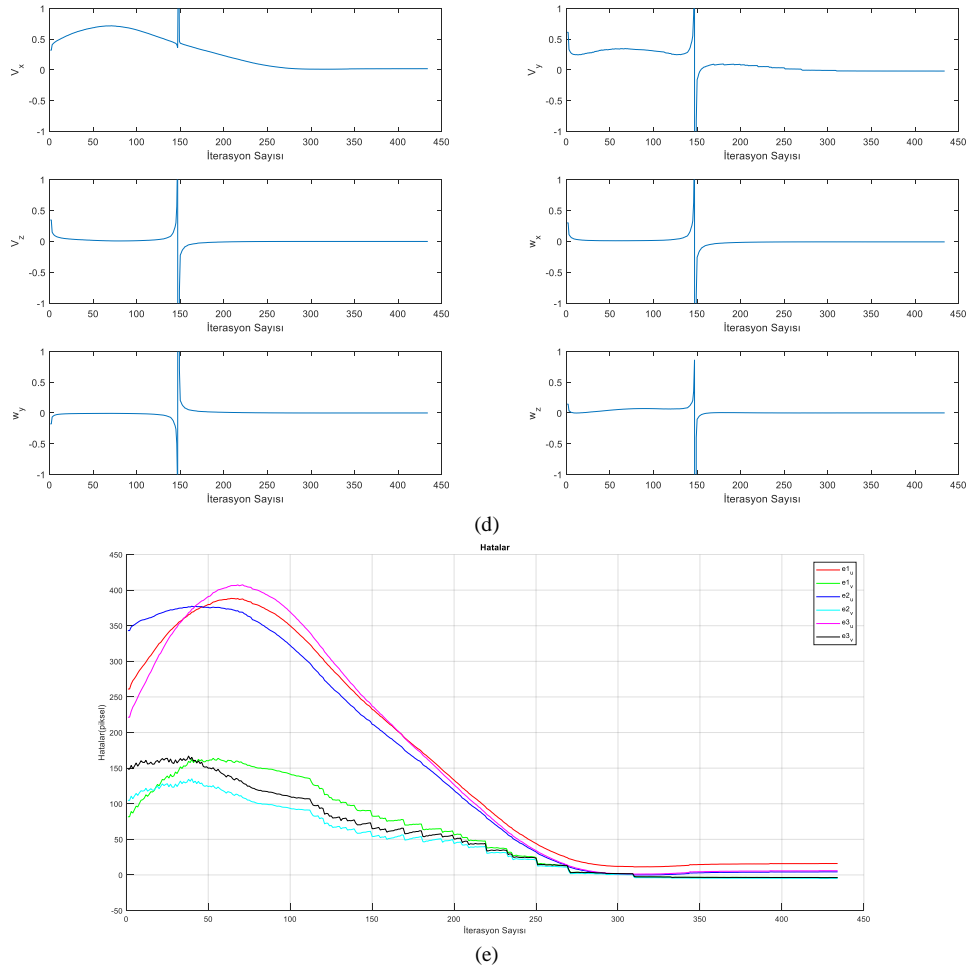
Şekil 6.a görüntü düzlemindeki 3 öznitelik noktasının başlangıç duruşu verilmektedir. Özniteliklerin hedef özniteliklerle ilişkisini göstermek adına her bir öznitelğin bağlı olduğu hedef sırasıyla kırmızı yeşil ve mavi çizgilerle birbirine bağlanmış, kırmızı + sembolüyle hedef öznitelikler gösterilmiştir. Şekil 6.b’de ise 3 öznitelik noktasının bitiş duruşu verilmektedir. Şekil 6.c’de ise özniteliklerin klasik GTGS ile izlediği yörüngeler sırasıyla kırmızı yeşil ve mavi renklerle verilmektedir. Şekil 6.d’de ise uç işlevcisine ait 3B uzaydaki hızlar verilmiştir. Bu hızlar incelendiğinde 148. iterasyonda ani bir hız değişimi göze çarpmaktadır. Bu ani değişim etkileşim matrisindeki işaret değişimlerine bağlı olarak yalancı tersinin getirdiği bir ani değişimdir. Sistemin bu tip değişimlerden uzak tutabilmek amacıyla hız türevine sınırlama getirilmiştir.

Şekil 6.e’de ise özniteliklere dair hatalar gösterilmiştir. Öznitelik hatalarının sıfıra yakınsadığı açıkça görülmektedir. Buradaki kalıcı hatalar ise hedef öznitelikler için tanımlanan değerlerin elde edilmesi sırasında kameranın getirdiği bozulmadan ve kameranın aydınlatma koşullarından kaynaklandığı belirtilmelidir.

B. Önerilen GTGS Sistemi Sonuçları

Önerilen GTGS sisteminin ilk adımı olan akıllı yakınsayıcılar ile etkileşim matrisi tersine yakınsarken yakınsayıcı girişi her bir özneliğe dair hata vektörü olacaktır. Yakınsayıcıdan beklenen ise kestirilmiş etkileşim matrisi tersi ile hata vektörü çarpımının oluşturduğu fonksiyona yakınsamasıdır. Bu sayede öznelik nokta sayısı ile değişen etkileşim matrisi eleman sayısı yerine öznelik nokta sayısından bağımsız, sadece doğrusal ve açısal hızlara etkiyen 6 çıkış bulunacak, böyle akıllı birimin yapının 6 giriş-6 çıkışlı olacaktır. Sistemde akıllı yakınsayıcı olarak YSA, RTA ve EÖM kullanılmıştır. Bu akıllı yakınsayıcılarının yakınsama işlemini yapabilmesi için öncelikle oluşturulan bir eğitim veri kümesiyle öğrenme aşamasından geçmesi gerekir. Akıllı yakınsayıcılar için eğitim verileri klasik GTGS ile elde edilmiştir. Eğitim verisi oluşturulurken yakınsama başarımını artırmak için olası tüm görsel servolama senaryolarını içerecek şekilde bir veri kümesi hazırlanmalıdır. Bu sebeple farklı başlangıç öznelik matrisine sahip klasik GTGS ile veriler toplanıp birleştirilmiştir. Hedef özneliklerine dair matris ve bu özneliklere dair robot eklem konum vektörü (5) ile tanımlanmıştır. Derinlik için kestirim olarak da $\hat{Z} = 0.30$ m. kullanılmıştır.





Şekil 6. Klasik GTGS sonuçları (a) Özniteliklerin başlangıç duruşları (b) Özniteliklerin bitiş duruşları (c) Öznitelik yörüngeleri (d) Uç işlevcisine ait 3B hızlar (e) Öznitelik hataları

Veri kümesi hazırlama için görüntü düzlemi 4 bölgeye ayrılmış ve her bölgeden 5 farklı başlangıç noktasıyla yukarıdaki hedefe ulaşmaya çalışan klasik GTGS verileri alınmıştır. Her bir veri kümesi için 344 örnek alınmıştır. Akıllı yakınsayıcıların başarımını artırmak için her bir çıkış için bir yakınsayıcı kullanılmıştır. Böylece girişi $6 \times (344 \times 20)$, çıkışı $1 \times (344 \times 20)$ boyutlu verilerle akıllı yakınsayıcılar eğitilmiştir.

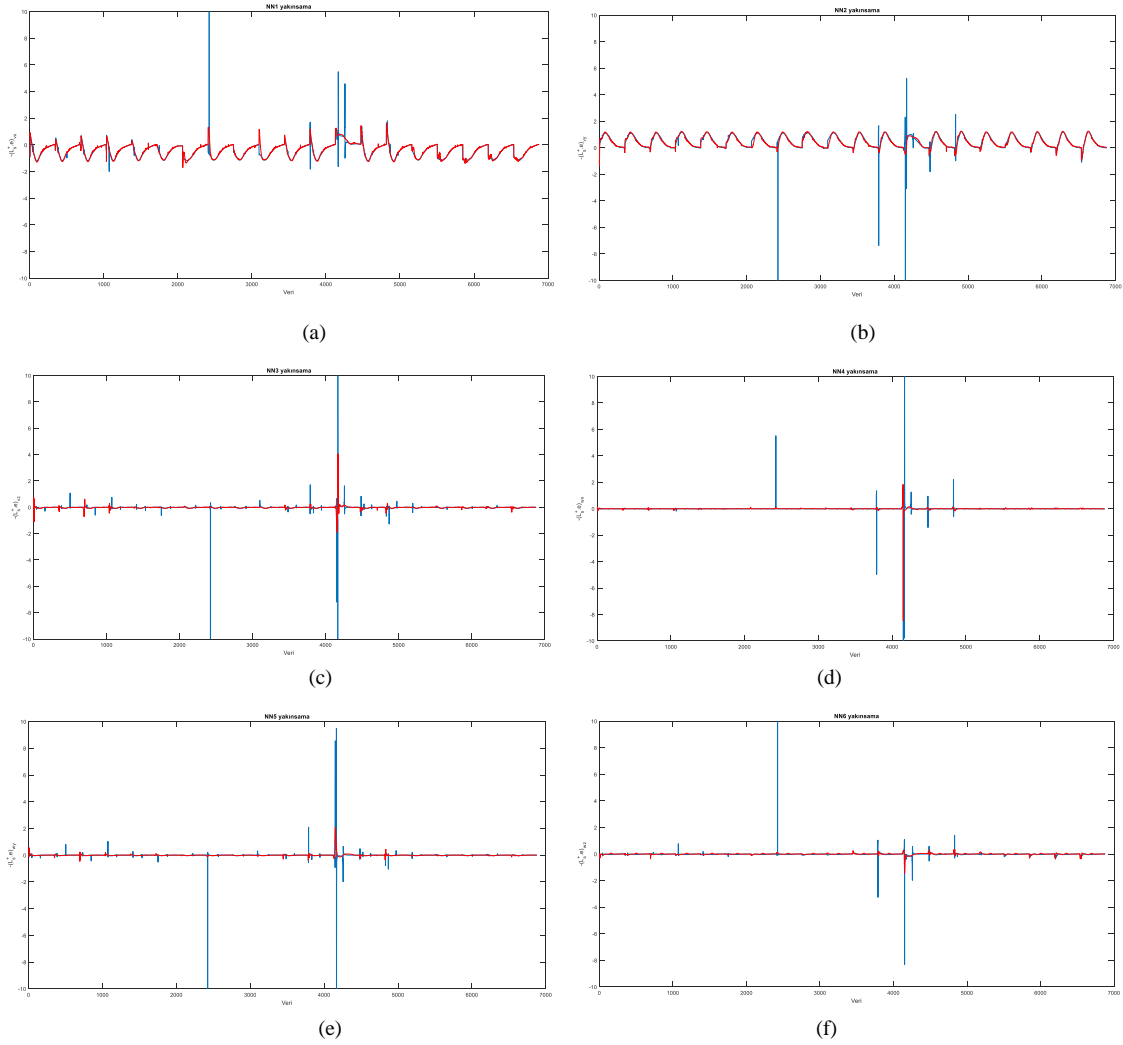
YSA oluşturma ve eğitimi için MATLAB Neural Network Toolbox kullanılmıştır. İlk olarak her biri 3 katmanlı 6 YSA her biri bir çıkış için eğitilmek üzere oluşturulmuştur. Bu YSA'ların birinci ve ikinci katmanında 10'ar nöron bulunmaktadır ve bu nöronlar aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant sigmoid kullanılmaktadır. Çıkış katmanlarında ise her birinde tek çıkış olduğu için 1 nöron bulunmaktadır ve YSA'lar fonksiyon yakınsama yaptığından bu nöronlar doğrusal tipte aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. YSA'lar literatürde en başarılı kabul edilen Resilient Backpropagation (RP) ve Levenberg-Marquart (LM) algoritmaları ile eğitilmiş [26], LM algoritmasının başarımı daha yüksek olduğundan bu algoritma ile devam edilmiştir. Hata hedefi olarak sıfır ve 1000 eğitim adımı (epoch) sonunda YSA'lara dair elde edilen ortalama karesel hata (MSE) değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde 3 ve 5 no'lu YSA'ların MSE değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi yakınsanacak fonksiyondaki ani ve büyük değişimleri YSA'nın yakalayamamasıdır. YSA'ların yakınsadığı fonksiyonların yakınsama başarımı tüm veri kümesi için Şekil 7'de mavi gerçek fonksiyonu, kırmızı YSA yakınsama sonucunu göstermek üzere verilmektedir.

Şekil 7'deki yakınsama sonuçları incelendiğinde 20 farklı yörüngeye ait veri setinden 4. (1073 no'lu

Tablo 3. YSA yakınsama sonuçları

YSA numarası	Yakınsadığı fonksiyon	Ortalama karesel hata (MSE)
1	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_x}$	0.011
2	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_y}$	1.0313
3	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_z}$	60.4476
4	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_x}$	0.0786
5	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_y}$	24.9105
6	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_z}$	0.4007



Şekil 7. YSA yakınsama sonuçları

$$(a) \text{ YSA1} \rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_x} \quad (b) \text{ YSA2} \rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_y} \quad (c) \text{ YSA3} \rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_z}$$
$$(d) \text{ YSA4} \rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_x} \quad (e) \text{ YSA5} \rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_y} \quad (f) \text{ YSA6} \rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_z}$$

örnek), 8. (2423 no'lu örnek) ve 13. (4167 no'lu örnek) örnek setlerindeki yüksek fonksiyon değerleri göze çarpmaktadır. Bu yüksek fonksiyon değerlerinin kaynağı etkileşim matrisinin yalancı tersine dair ani değişimlerdir. Buna rağmen 6 YSA bu yüksek değerlere yakınsamaya çalıştığı Şekil 7.c-d-e'de görülmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere Tablo 3'teki yüksek MSE değerlerinin kaynağı bu noktadaki yüksek yakınsama hatalarıdır.

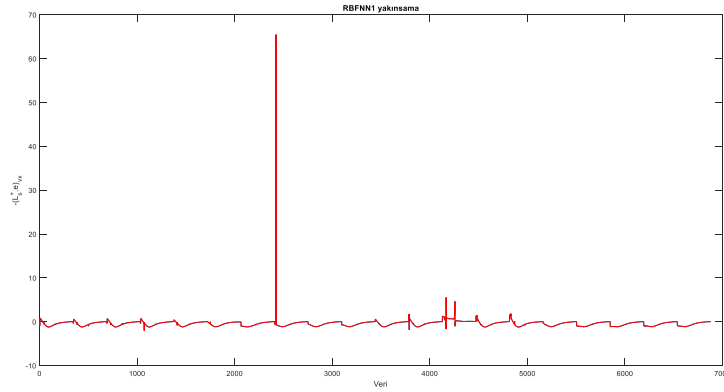
İkinci yakınsayıcı olarak kullanılan RTA, iki katmanlı bir yapı olup birinci katmanında radyal tabanlı fonksiyon adı verilen $e^{-(x^2)}$ fonksiyonu ile tanımlı fonksiyonlardan oluşan bir gizli katmanı ve doğrusal çıkış veren bir çıkış katmanı bulunmaktadır. RTA için MATLAB Neural Network Toolbox'ta iki seçenek bulunmaktadır. Birinci seçenekte veri sayısı kadar radyal fonksiyonlu nöron bulunduran RTA yapısı tanımlanırken ikinci yapıda verilen hedef MSE değerine göre ilk katmana radyal tabanlı nöron ekleyerek ilerleyen RTA yapısı bulunmaktadır. İkinci yapı daha az nöron kullanması sayesinde işlem yükünü kademeli olarak artırsa da işlem gücünün gelişmesiyle birlikte bu sorun ortadan kalkmıştır. Buna göre kullanılan birinci

Tablo 4. RTA yakınsama sonuçları

RTA numarası	Yakınsadığı fonksiyon	Ortalama karesel hata (MSE)
1	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_x}$	1.7620e-20
2	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_y}$	2.2986e-20
3	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_z}$	1.3572e-21
4	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_x}$	5.6293e-21
5	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_y}$	6.6660e-21
6	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_z}$	1.0044e-21

seçenekteki RTA'da ilk katmanda 6880 nöron (20×344) bulunmaktadır. Hata hedefi olarak sıfır olarak elde edilen ortalama karesel hata (MSE) değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4'teki sonuçlar RTA'ların girişle tam bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Elde edilen grafiklerde yakınsanan fonksiyon ile hiçbir fark görülmediğinden sadece örnek olması açısından birinci fonksiyona dair yakınsama Şekil 8'de verilmiştir. Burada mavi gerçek fonksiyonu, kırmızı RTA yakınsama sonucunu göstermektedir.



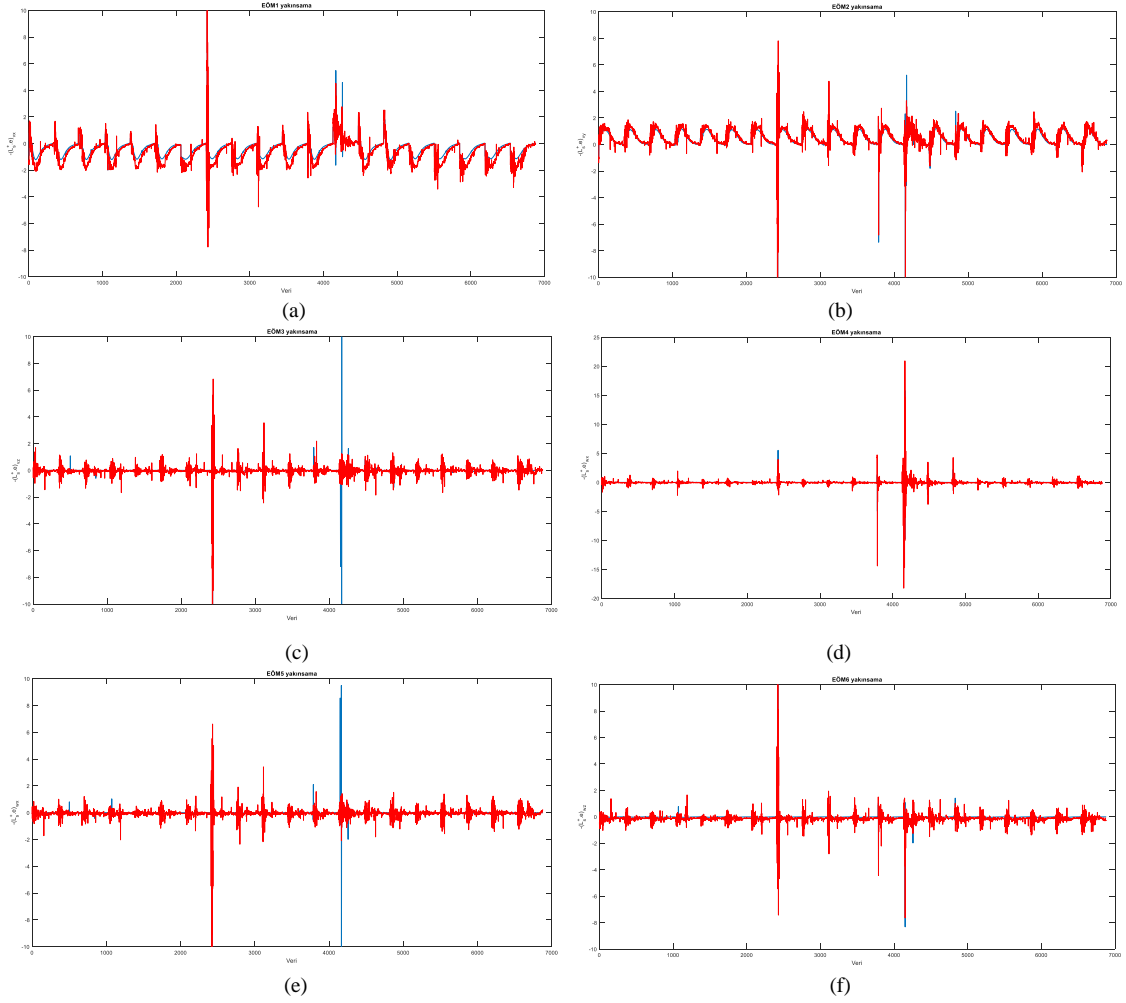
Şekil 8. $-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_x}$ veri setine ait RTA yakınsama sonucu

Burada her ne kadar RTA'nın YSA'dan çok daha fazla parametreyle iyi yakınsama sonuçları verdiği söylene de YSA'nın bozuculara karşıda RTA'ya göre daha gürbüz sonuçlar vereceği beklentisinin de literatürde verildiği belirtilmelidir. Ayrıca RTA'daki nöron sayısı fazlalığı çok yüksek hesapsal yüke sebep olmaktadır.

Üçüncü yakınsayıcı olarak kullanılan ve YSA ailesinin son üyelerinden olan EÖM tek gizli katmanlı YSA yapısındadır ve gizli katmanının parametrelerinde ayarlamaya ihtiyaç duymamaktadır [27]. Ayrıca tek aşamalı öğrenme adımıyla hesapsal yükü oldukça indirgenmiştir. Akıllı yakınsama için tek çıkışlı yapısı sebebiyle 1000 nörona sahip 6 farklı EÖM eğitim için kullanılmış ve yakınsama sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. EÖM'lar fonksiyon yakınsama için 0-1 arası çıkış verebildiklerinden giriş eğitim veri kümesi normalize edildikten sonra eğitim için kullanılmıştır. EÖM'in yakınsadıkları fonksiyonlara dair sonuçlar ise Şekil 9'da verilmiştir.

Tablo 5. EÖM yakınsama sonuçları

EÖM numarası	Yakınsadığı fonksiyon	Ortalama karesel hata (MSE)
1	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_x}$	1.1664e-04
2	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_y}$	1.1236e-04
3	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_z}$	1.1025e-04
4	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_x}$	7.7440e-05
5	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_y}$	1.1449e-04
6	$-(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_z}$	9.0250e-05



Şekil 9. EÖM yakınsama sonuçları

- (a) EÖM1 $\rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_x}$ (b) EÖM2 $\rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_y}$ (c) EÖM3 $\rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{v_z}$
(d) EÖM4 $\rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_x}$ (e) EÖM5 $\rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_y}$ (f) EÖM6 $\rightarrow -(\hat{L}_s^+ \cdot e)_{\omega_z}$

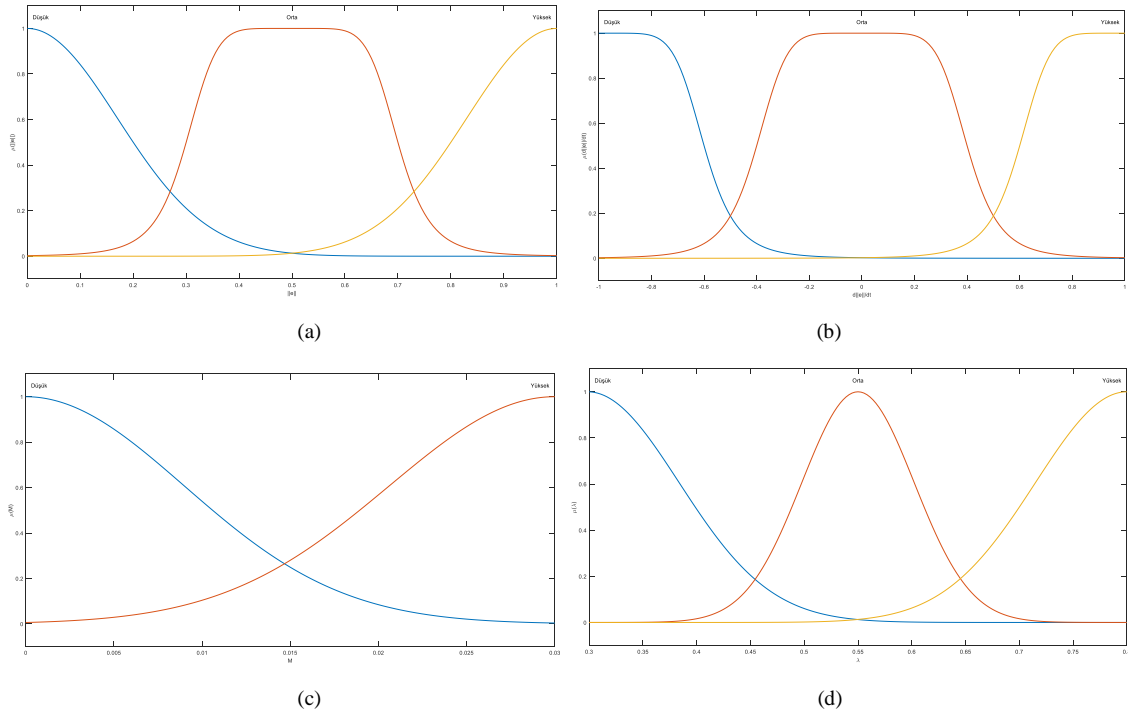
Şekil 9'daki EÖM yakınsama sonuçları ve Tablo 5'teki MSE değerleri incelendiğinde her ne kadar başarımın yüksek olduğu görülse de EÖM'nin getirdiği ani değişimler göze çarpmaktadır. Bu ani değişimlerin de tıpkı etkileşim matrisinin yalancı tersinin getirdiği yüksek hızlar problemini getireceği aşikardır.

Önerilen yakınsayıcılar GTGS sistemi üzerinde denendiğinde YSA ve EÖM yakınsayıcılarının her ne kadar başarımları yüksek olsa da GTGS sisteminde öznitelikleri görüntü dışına çıkararak ıraksamaya sebep oldukları yapılan deneyler sonucunda görülmüştür. RTA yakınsayıcı ise tıpkı klasik GTGS gibi sonuç vermekte ve aynı başarımı yakalamaktadır. RTA sonuçları aynı olduğundan deneysel sonuçlara tekrar yer verilmemiştir.

Önerilen sistemin ikinci aşaması için farklı kazanç değerlerinde klasik GTGS davranışları incelendiğinde ($0.3 \leq \lambda \leq 0.8$) düşük kazanç değerlerinde düşük hız profilleriyle beraber yakınsama iterasyon sayısının 500'lere kadar çıktığı görülmektedir. Yüksek kazanç değerlerinde ise her ne kadar iterasyon sayısında düşüş olsa da robot manipülörün uç işlevci hız limiti olarak kabul edilen ± 1 m/s-rad/s değerlerinin özellikle v_x, v_y doğrusal hızlarında aşıldığı gözlemlenmiştir. Aynı değerlerde hareketlilik incelendiğinde doğası gereği düşük M değerlerinde robotun tekillik koşullarına yakın olduğu, bu sebeple robot hızlarının düşürülmesi

gerektiği gözlemlenmiştir. Yani hareketlilik düşüğe kazanç değeri düşürülmelidir. M değerinin yapılan deneylerde 0-0.03 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir.

Farklı kazanç değerleri için klasik GTGS davranışları göz önünde bulundurularak 3 girişli ($\|e\|, d\|e\|/dt, M$) bir BM yapısı MATLAB Fuzzy Logic Toolbox kullanılarak oluşturulmuştur. Değişken kazanç için kullanılan BM birimi Mamdani tipindedir ve çıkış, üyelik işlevleri cinsinden tanımlanmıştır. Birleştirme yöntemi olarak maksimum, durulaştırma yöntemi olarak ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Girişlere ve çıkışa dair üyelik işlev tipi olarak gauss ve genelleştirilmiş çan kullanılmıştır. $\|e\|$ ve $d\|e\|/dt$ değerleri bulanık mantık birimine normalize edilerek uygulanmıştır. Bu normalizasyonda hata normu 700, hata türev normu 15 ile sınırlandırılmıştır. $\|e\|$ ve $d\|e\|/dt$ için Düşük-Orta-Yüksek olmak üzere 3 üyelik işlevi ve M için Düşük-Yüksek olmak üzere iki üyelik işlevi tanımlanmıştır. λ için çıkış üyelik işlevi olarak Düşük-Orta-Yüksek olmak üzere 3 üyelik işlevi kullanılmıştır. Girişlere ve çıkışa dair üyelik işlevleri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Değişken kazanç BM biriminin üyelik işlevleri

(a) $\mu(\|e\|)$ (b) $\mu(d\|e\|/dt)$ (c) $\mu(M)$ (d) $\mu(\lambda)$

Farklı kazanç değerleriyle klasik GTGS deneyleri sonucunda elde edilen bulgular ve gözlemler sonucu oluşturulmuş BM kural tablosu Tablo 6'da verilmiştir. Şekil 10'daki üyelik işlevleri ve Tablo 6'daki kural tablosuyla BM biriminin giriş-çıkış yüzeyi $\|e\|$ ve $d\|e\|/dt$ 'ye karşılık λ için Şekil 11'de verilmiştir.

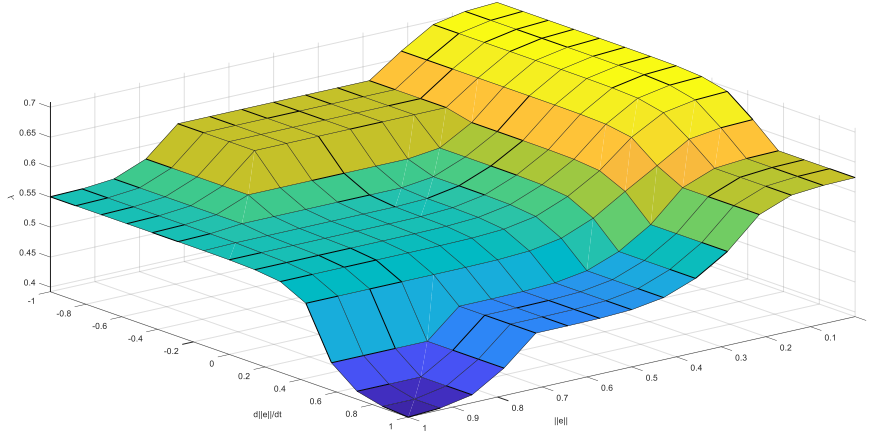
Senaryo olarak karşılaştırma açısından (4) ve (5) hedef öznelilikler ve eklem başlangıç koşulları seçilmiştir. Bu senaryo ile elde edilen 3B uç işlevci hızları Şekil 12.a'da, öznelilik hataları Şekil 12.b'de, değişken kazancın değişimi Şekil 12.c'de ve hareketliliğin klasik GTGS ile karşılaştırması Şekil 12.d'de verilmiştir.

Şekil 12.c incelendiğinde λ_a 'nın BM biriminin Şekil 10'teki üyelik işlevlerine ve Tablo 6'daki kural tabanına göre değişimi gözlemlenmektedir. Bu değişimde 0-50 iterasyon arası hızlı değişimler göze çarpmaktadır. Bu hızlı değişimin sebebi hata türev normundaki ani değişimlerdir. Bu ani kazanç değişimlerinin etkileri Şekil 12.b'deki hatalarda ve Şekil 12.a'daki özellikle v_x sinyalinde açıkça görülmektedir.

Yakınsama iterasyon sayısı göz önünde bulundurulduğunda ise Şekil 6.e'deki klasik GTGS sistemine dair hatalar ve Şekil 12.b'deki hatalar incelendiğinde klasik GTGS sistemine ait hata normunun 16 pikselin altına 288. iterasyonda indiği görülürken değişken kazançlı GTGS sisteminin 215. iterasyonda indiği

Tablo 7. Değişken kazanç BM birimi kural tablosu

Giriş $\ e\ $	Giriş $d\ e\ /dt$	Giriş M	Çıkış λ
DÜŞÜK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	YÜKSEK
DÜŞÜK	DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK
DÜŞÜK	ORTA	DÜŞÜK	YÜKSEK
DÜŞÜK	ORTA	YÜKSEK	YÜKSEK
DÜŞÜK	YÜKSEK	DÜŞÜK	ORTA
DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK	YÜKSEK
ORTA	DÜŞÜK	DÜŞÜK	ORTA
ORTA	DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK
ORTA	ORTA	DÜŞÜK	ORTA
ORTA	ORTA	YÜKSEK	ORTA
ORTA	YÜKSEK	DÜŞÜK	DÜŞÜK
ORTA	YÜKSEK	YÜKSEK	ORTA
YÜKSEK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	ORTA
YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK	ORTA
YÜKSEK	ORTA	DÜŞÜK	ORTA
YÜKSEK	ORTA	YÜKSEK	ORTA
YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK	DÜŞÜK
YÜKSEK	YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK



Şekil 11. Değişken kazanç BM biriminin giriş-çıkış yüzeyi

görülmektedir. Bu açıdan karşılaştırıldığında önerilen GTGS sistemi yaklaşık %25.35 daha hızlı yakınsamaktadır. Bu hızlı yakınsamayla beraber Şekil 6.d klasik GTGS sistemine dair hızlar ve Şekil 12.a'daki hızlar incelendiğinde ise hız değerlerinde büyük artışların olmadığı ve hız limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir. Böylece önerilen sistemle hız limitleri içinde daha hızlı yakınsama sağlandığı söylenebilmektedir.

Şekil 12.d'de ise klasik GTGS sistemine ve BM tabanlı değişken kazançlı sisteme dair hareketlilik sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde önerilen sisteme dair hareketlilik değişiminin klasik GTGS sistemi ile neredeyse aynı kaldığı ve bir üstünlük sağlanamadığı, hatta 150-180 iterasyon aralığında klasik GTGS sisteminin daha üstün kaldığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak önerilen sistemin hareketlilik açısından sisteme bir kazanç sağlayamadığı söylenebilmektedir.

Önerilen sistemin üçüncü aşamasında yaklaşılan görüntü sınırına zıt yönde bir hareket ile öznitelikleri görüş alanı içinde tutma yaklaşımı önerilmiştir. Bu zıt yönlü hareket için tanımlanacak hız değeri de önerilen sistemde BM kullanılarak tanımlanmıştır. Bölüm II'de yapılan üç bölge tanımlamalarıyla 1280×960 çözünürlüklü görüntüde bölge sınırları aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\text{Bölge Tipi } (u, v) = \begin{cases} \text{Bölge A} & \text{eğer } u < 1050 \& v < 825 \\ \text{Bölge B} & \text{eğer } 1050 \leq u < 1200 \mid 825 \leq v < 900 \\ \text{Bölge C} & \text{eğer } u \geq 1200 \mid v \geq 900 \end{cases} \quad (6)$$

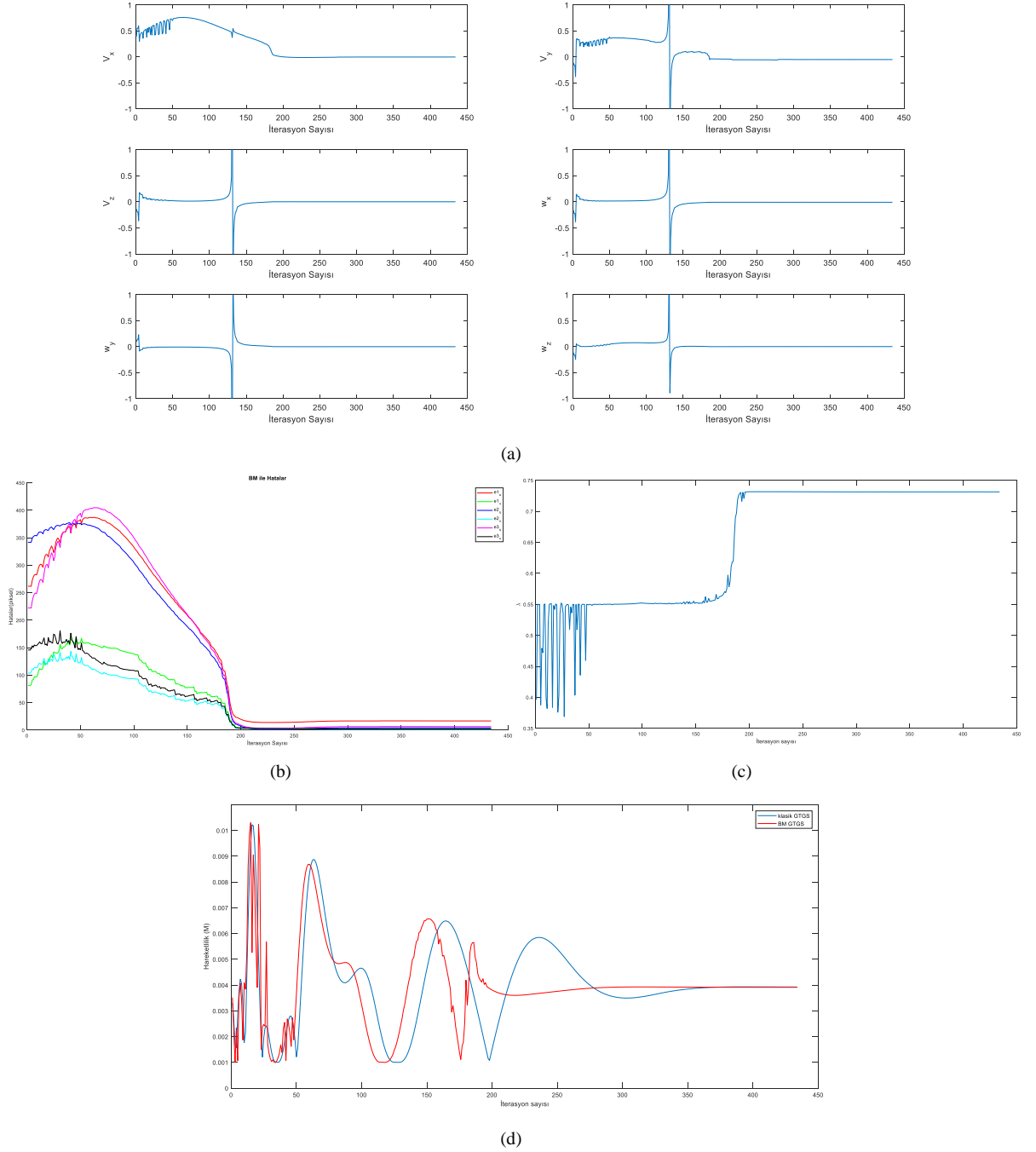
İlk olarak tanımlı Bölge B ve C'ye giren öznitelikleri güvenli sayılan Bölge A'ya doğru sürüklemek için manuel denemeler yapılmıştır. Bu denemelerde u yönünde Bölge A'yı terk eden öznitelikler için zıt yönlü $\max(v_x^{FOV}) = 0.1 \text{ m/s}$ maksimum değerli bir hız ve v yönünde Bölge A'yı terk eden öznitelikler için zıt yönlü $\max(v_x^{FOV}) = 0.1 \text{ m/s}$ maksimum değerli bir hız tanımlamasının yeterli olduğu görülmüştür. Bu tanımlamalarla görüş alanı koruma için yeni tanımlanan uç işlevci hızları aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} v'_x &= v_x - v_x^{FOV} \\ v'_y &= v_y - v_y^{FOV} \end{aligned} \quad (7)$$

$$v = [v'_x \quad v'_y \quad v_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T \quad (8)$$

Elde edilen maksimum zıt yönlü hızların Bölge B'de uygulanması sürekli bölge geçişine sebep olup hız işaretlerinde çatlartıya sebep olacağı aşikardır. Bunun yerine projede Bölge B'ye giren öznitelikler için tanımlanacak zıt yönlü hızlar birer BM birimiyle tanımlanmıştır. Bu BM birimleriyle (8)'deki hızlar şu şekilde tanımlanmıştır:

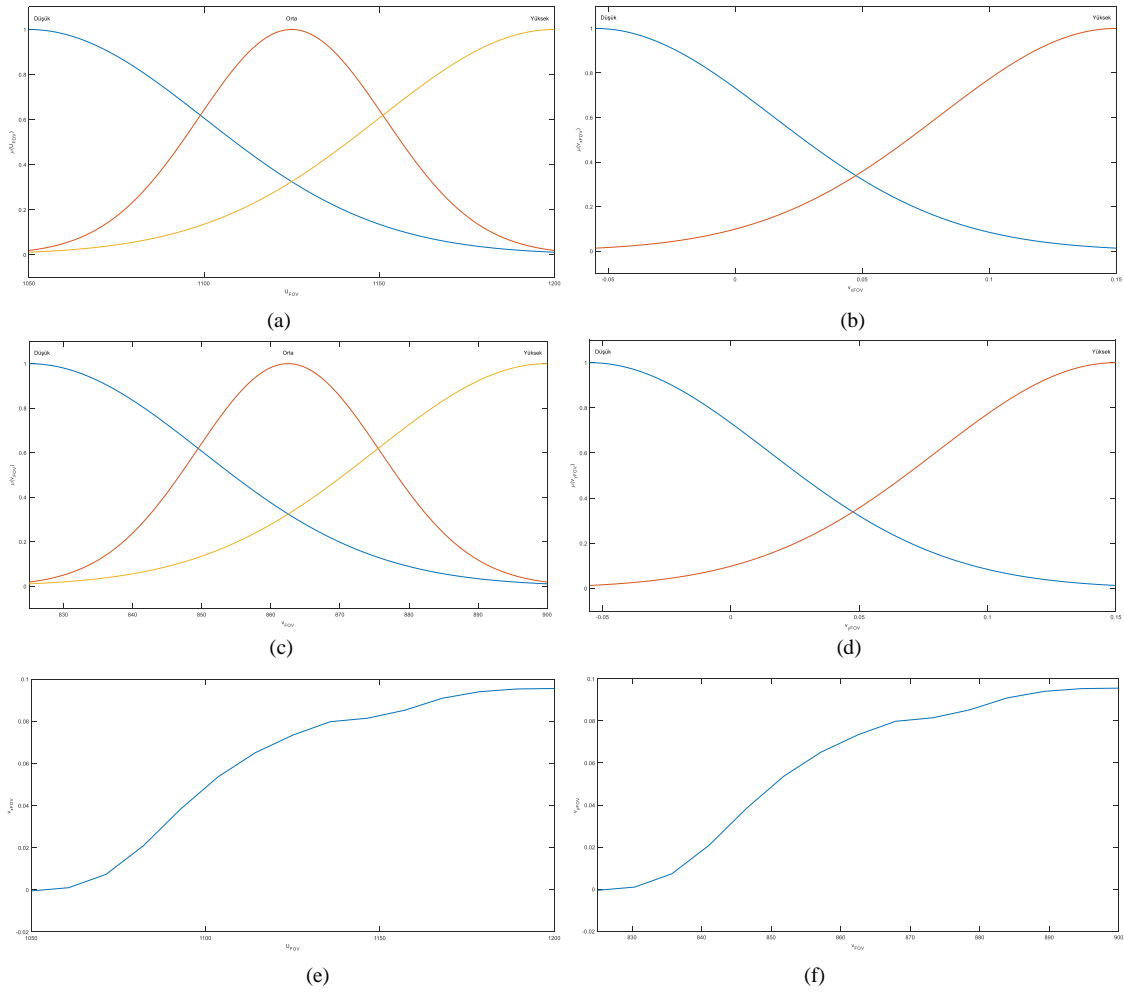
$$s'_i = \{s_i \in s | \max(s)\}, \forall i = 1,2,3 \quad (9)$$



Şekil 12. BM kullanan değişken kazanç sonuçları
(a) Uç işlevci hızları (b) Öznitelik hataları (c) λ (d) Hareketlilik

$$\begin{aligned}
 s'_i(u_i, v_i) \in \text{Bölge A} &\Rightarrow v_x^{FOV} = 0, v_y^{FOV} = 0 \\
 s'_i(u_i, v_i) \in \text{Bölge B} &\Rightarrow v_x^{FOV} = BM_x^{FOV}(u_i), v_y^{FOV} = BM_y^{FOV}(v_i) \\
 s'_i(u_i, v_i) \in \text{Bölge C} &\Rightarrow v_x^{FOV} = v_{x_max}^{FOV}, v_y^{FOV} = v_{y_max}^{FOV}
 \end{aligned} \quad (10)$$

(10)'daki BM birimler Mamdani tipinde, giriş-çıkış üyelik işlevleri gauss şeklinde, durulaştırma yöntemi ağırlıklandırılmış ağırlık merkezi olarak seçilmiş, kural tabanlıysa üç kural yumuşak hız geçişi sağlayacak şekilde tanımlanmıştır. BM birimlerinin üyelik işlevleri ve yüzeyleri Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Görüş alanı koruma için kullanılan BM birimleri

(a) BM_x^{FOV} giriş üyelik işlevleri (b) BM_x^{FOV} çıkış üyelik işlevleri (c) BM_y^{FOV} giriş üyelik işlevleri

(d) BM_y^{FOV} çıkış üyelik işlevleri (e) BM_x^{FOV} giriş-çıkış yüzeyi (f) BM_y^{FOV} giriş-çıkış yüzeyi

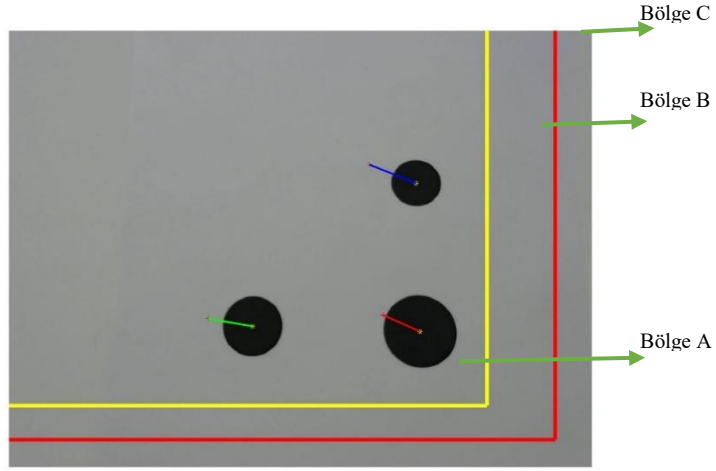
Görüş alanı korumayı göstermek için özniteliklerin Bölge B'ye geçtiği bir GTGS durumu ele alınmıştır. Bu GTGS durumunda, $s^*(u, v)$ (4)'teki gibi kalırken $q_{FOV}(0)$ başlangıç eklem açıları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$q_{FOV}(0) = [-20.3 \quad -23.1 \quad -71.4 \quad 2.2 \quad 66.5 \quad -83.9]^\circ \quad (11)$$

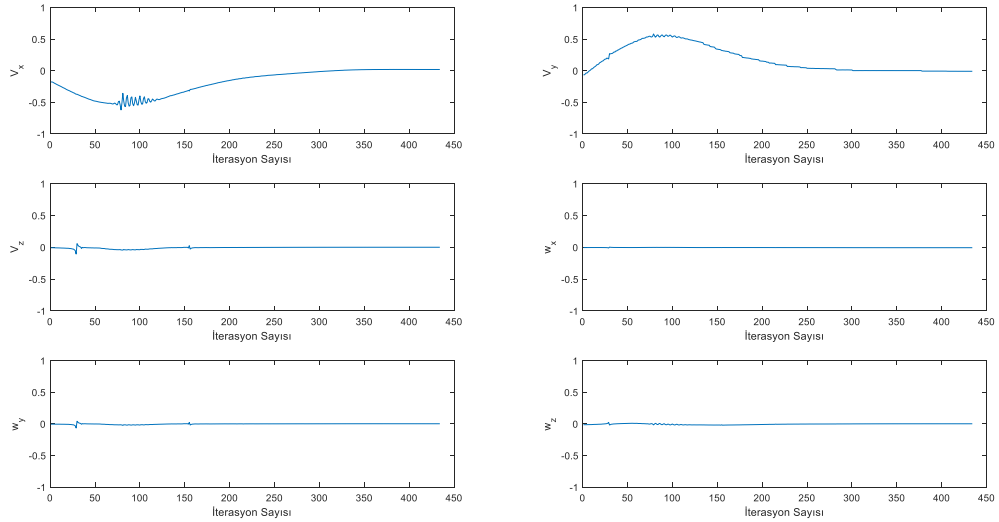
Bu senaryo için başlangıç öznitelik durumları bölge gösterimleriyle beraber Şekil 14’de, elde edilen uç işlevci 3B hızları, öznitelik hataları ve öznitelik yörüngeleri Şekil 15’te verilmiştir.

Şekil 15.a ve 15.b incelendiğinde özniteliklerin Bölge B’ye girdiği 49. iterasyondan itibaren görüş alanı için kullanılan BM_x^{FOV} ’un devreye girdiği, hız ve hata sinyallerinde çattırıtı oluştuğu görülmektedir. Bu çattırıtının sebebi Şekil 15.c’de görüldüğü üzere öznitelikler Bölge B’deyken onları sürükleyen zıt yönlü hızın devreden çıkmasıyla GTGS sebebiyle özniteliklerin tekrar Bölge B’ye doğru yönelmesi ve tekrar BM_x^{FOV} biriminin zıt yönlü hız uygulamasıyla tekrar Bölge A’ya geçmesidir. Bu çattırıtının yok edilmesi ve özniteliklerin Bölge B’ye girdiği anda sadece Bölge A-Bölge B hat çizgisinde kalmasını sağlamak için denemeler devam etmektedir.

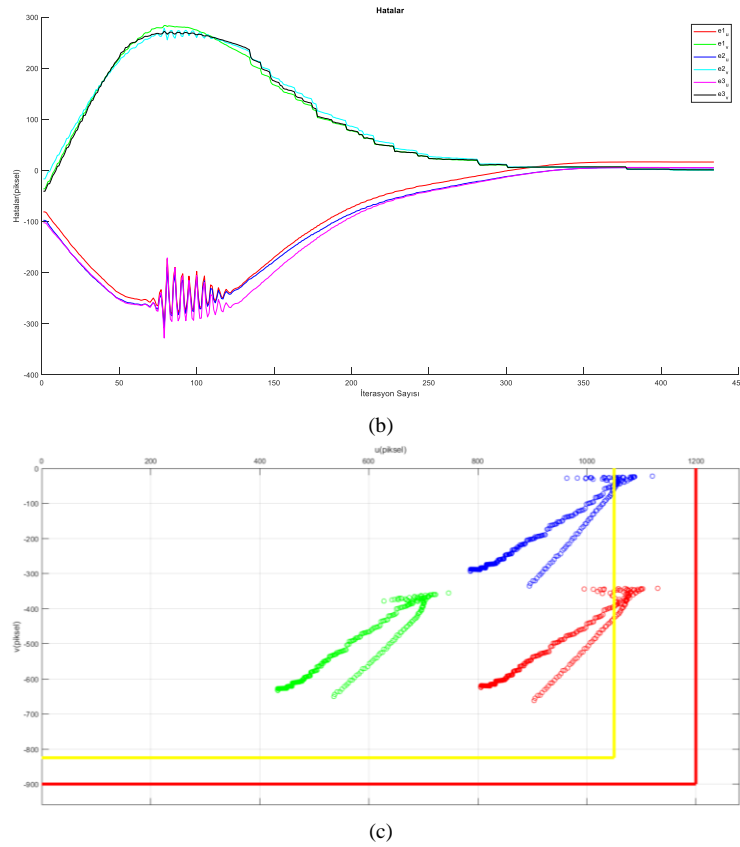
Önerilen sistemle üç farklı GTGS problemine sunulan çözümlerin aynı anda beraber çalışabilirliği amaçlarındandır. Burada bu denemelerde değişken kazancın getirdiği ani ve büyük değişimler doğrultusunda



Şekil 14. Görüş alanı koruma örneği için başlangıç öznitelikleri ve bölgeler



(a)



Şekil 15. Görüş alanı koruma örneği için sonuçlar

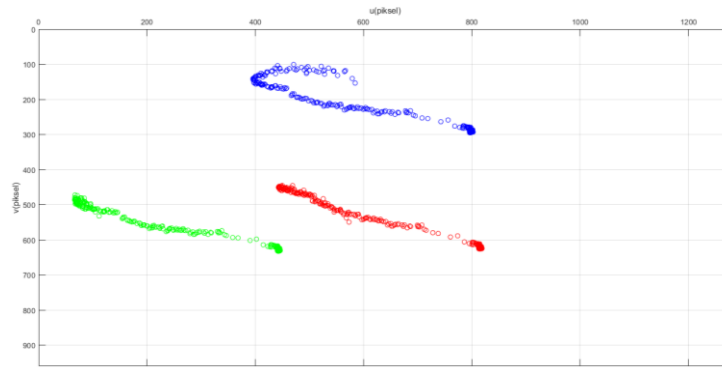
(a) Uç işlevci ait 3B hızlar hızları (b) Öznitelik hataları (c) Özniteliklerin yörüngeleri

yakınsayıcılar istenilen başarıyı elde edememiş ve GTGS yakınsaymadan eldeki öznitelikler BM tabanlı görüş alanı korumasını da aşarak görüntü dışına çıkmışlardır. Burada özniteliklerin görüntü dışına çıkışları yine ani gelen değişimlere bağlı ani hız değişimlerinden ve BM biriminin oluşturduğu zıt yönlü hızların yeterli kalamamasındandır.

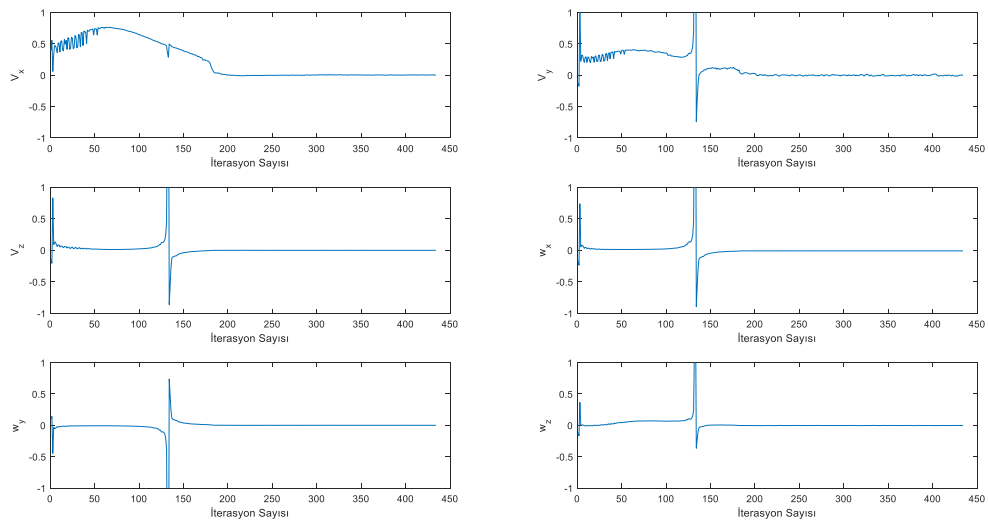
Önerilen sistemin görüntüye bağlı olarak özniteliklerde görülebilecek gürültülere karşı gürbüz olması önerilen sistemin amaçlarındandır. Bu amaç doğrultusunda önerilen sisteme literatürdeki çalışmalara benzer [28] her adım için rasgele 2 piksel öznitelik gürültüsü altında aynı başarıyı elde edip etmediği denenmiştir. Burada, literatürdeki çalışmalara bakarak bu bozucu etkiler için analitik bir çıkarım yapılamayacağı, sadece deneysel çalışma ile gürbüzlüğü kanıtlanabileceği belirtilmelidir.

Senaryo olarak karşılaştırma açısından yine (4) ve (5) hedef öznitelikler ve eklem başlangıç koşulları seçilmiştir. Bu senaryo ile akıllı yakınsayıcıların hiçbiri yakınsama edemediğinden sadece BM tabanlı değişken kazancın devrede olduğu sonuçlar verilmiştir. Elde edilen öznitelik yörüngeleri Şekil 16.a'da, 3B uç işlevci hızları Şekil 16.b'da, değişken kazancın değişimi Şekil 16.c'de, öznitelik hataları Şekil 16.d'de verilmiştir.

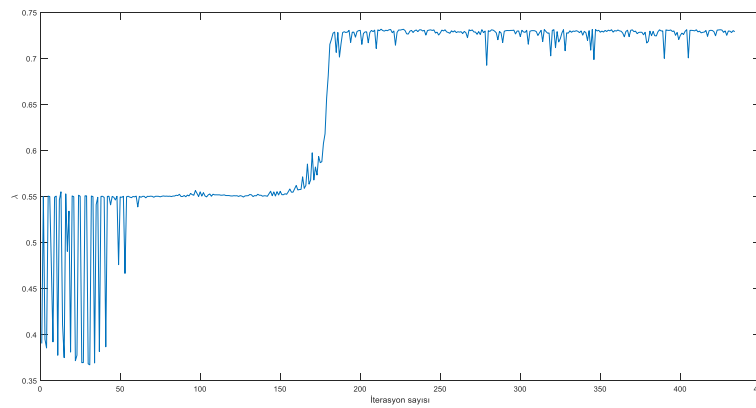
Şekil 16 ve Şekil 12'deki sonuçlar karşılaştırıldığında öznitelik yörüngelerindeki ve hatalardaki değişimlerin değişen kazanç durumundakinden daha da fazla büyüdüğü açık bir şekilde görülmektedir. Rasgele gürültünün getirdiği bu değişimler Şekil 16.c'de değişken kazanç için de ani değişim, Şekil 16.b'deki hızlarda da çatırtı olarak ortaya çıkmaktadır. Devamında sistem yakınsamayı sağladığı 200. iterasyondan sonra da gürültünün etkilerinin devam ettiği Şekil 16.c'deki kazançta ve Şekil 16.d'deki öznitelik hatalarında açıkça görülmektedir. Bu çatırtılara rağmen önerilen GTGS sisteminin BM tabanlı değişken kazanç çözümünün öznitelik gürültülerine karşı gürbüzlüğü kanıtlanmış bulunmaktadır.



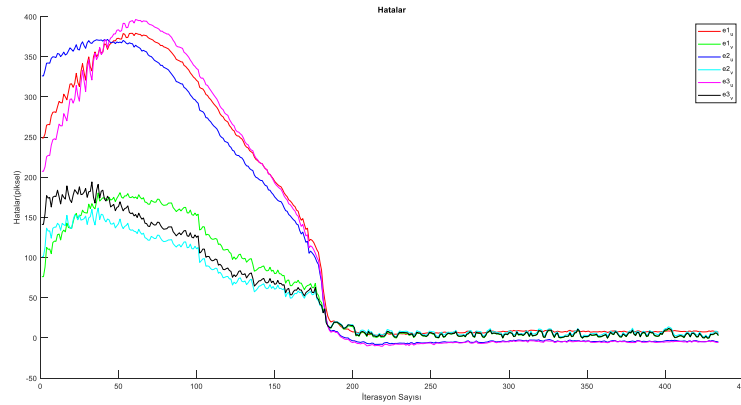
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 16. Öznitelik gürültüsünde BM kullanan değişken kazanç sonuçları

(a) Öznitelik yörüngeleri (b) Uç işlevci hızları (c) Değişken kazanç (d) Öznitelik hataları

IV. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Endüstriyel robot manipülatörlerin görsel geribeslemeli uygulamalarında GTGS duruş kestirimi gerektirmedikinden robot manipülatörler için popüler GS yaklaşımlarından biridir. GTGS tabanlı yenilikçi yaklaşımlar kontrolcü tasarımı ve kararlılık analizi gibi teorik sorunlara odaklanmanın yanında gerçekleştirilemeyen sorunlara da çözüm üretmek zorundadır. Bu gerçekleştirilemeyen sorunlarından temel üç tanesi sırasıyla etkileşim matrisinin tersinin eldesi, kontrolör için uygun bir sabit kazanç değerinin tanımlanması ve özniteliklerin görüş alanı içinde tutulmasıdır. GTGS için etkileşim matrisi her ne kadar yalancı tersi ile beraber kullanılsa da tekilliklerin oluşması durumunda kontrol yasası işleyememektedir. Diğer bir taraftan sabit kazanç değeri yakınsama hızı ile uç işlevci hızları arasında bir ödünleşmeye sebep olmaktadır. GTGS işleyişi sırasında özniteliklerin görüş alanını terk ederek GTGS'nin tamamen durmasına sebep olması da yaygın bir sorundur.

Bu çalışmada bu sorunları çözmek için önerilen akıllı yaklaşımların endüstriyel tipte bir robot manipülatör üzerine uygulanması hedeflenmiştir. Uygulamanın ilk aşaması olarak akıllı yaklaşımçı birimler etkileşim matrisinin tersinin yerini alması ve tekillik sorunu ortadan kaldırması hedeflenmiştir. İkinci aşama olarak sabit kazanç yerine her çevrimde hata ve hata türevinin değerine göre kazanç hesabı yapan bir bulanık mantık birimi kullanılmıştır. Ayrıca manipülatör tekilliklerinden uzak durmayı sağlayan hareketliliğin de bu birime bir giriş olarak verilmesi amaçlanmıştır. Üçüncü aşamada ise alınan görüntü düzleminde bölgeler tanımlanmış, bir bulanık mantık birimi yardımıyla özniteliklerin görüş alanı içerisinde kalması sağlanmıştır. Çalışmada tüm gerçeklemlere dair deneysel sonuçlar sunulmuştur.

İlk aşamadaki akıllı yakınsayıcılarda kabul edilebilir seviyede yakınsama sağlansa da YSA ve EÖM öznitelikleri görüntü dışına çıkararak ıraksamaya sebep oldukları GTGS üzerinde yapılan deneyler sonucunda görülmüştür. RTA yakınsayıcı ise tıpkı klasik GTGS gibi sonuç vermekte ve aynı başarıyı yakalamaktadır.

İkinci aşamadaki BM tabanlı değişken kazançta ise önerilen GTGS sisteminin klasik sisteme göre yaklaşık %25.35 daha hızlı yakınsadığı, hız değerlerinde büyük artışların olmadığı ve hız limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir. Böylece önerilen sistemle hız limitleri içinde daha hızlı yakınsama sağlandığı söylenebilmektedir.

Üçüncü aşamadaki BM tabanlı görüş alanı koruma yaklaşımında ise güvenli bölgeden çıkan özniteliklerin zıt yönlü tanımlanan hızlarla güvenli bölgeye sürüklendiği fakat burada kalmak yerine tekrar klasik GTGS tarafından tehlikeli bölgelere tekrar sürüklendikleri ve tekrar BM tabanlı görüş alanı koruma ile güvenli bölgeye çekildikleri gözlemlenmiştir. Belirli iterasyon diliminde devam eden bu durum sonucunda hız ve hata sinyallerinde çattırtilar ortaya çıkmıştır. Bu çattırtiların yok edilmesi ve özniteliklerin güvenli bölgeye çekildikten sonra bu bölgede kalmasını sağlamak için denemeler devam etmektedir.

Önerilen sistemle üç farklı GTGS problemine sunulan çözümlerin aynı anda beraber çalışabilirliği için yapılan denemelerde değişken kazancın getirdiği ani ve büyük değişimler doğrultusunda yakınsayıcılar istenilen başarıyı elde edememiş ve GTGS yakınsaymadan eldeki öznitelikler BM tabanlı görüş alanı korumasını da aşarak görüntü dışına çıkmışlardır. Burada özniteliklerin görüntü dışına çıkışları yine ani gelen değişimlere bağlı ani hız değişimlerinden ve BM biriminin oluşturduğu zıt yönlü hızların yeterli kalamamasındandır. Gelecek çalışmalarda bu üç çözümde gerekli iyileştirmeler yapılarak beraber istenen başarımda çalışmaları hedeflenmektedir. Ayrıca yapay zeka birimleri devreye girdiğinde gerçek zamanlı çalışmanın zor olduğu, gelecek çalışmalarda bu birimleri hızlandıracak GPU tabanlı çözümlerin kullanılması hedeflenmektedir.

Önerilen sistemin görüntüye bağlı olarak özniteliklerde görülebilecek gürültülere karşı gürbüz olması önerilen sistemin amaçlarındandır. Bu amaç doğrultusunda önerilen sistemde sadece BM tabanlı değişken kazanç için öznitelik gürültüsü altında denemeler yapılmış, benzer başarıma yakın sonuçlar elde edilerek sistemin gürbüzlüğü kanıtlanmıştır. Gelecek çalışmalarda bu üç çözümün beraber çalıştığı durumda da gürbüzlük hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 3001 kodlu Başlangıç Projeleri kapsamında TÜBİTAK-117E511 numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Hill, J.& Park W. T. (1979). Real time control of a robot with a mobile camera. *Proceedings of the 9th ISIR*, 233–246.
- [2] Hutchinson, S. A., Hager G. D. & Corke P. I. (1996). A tutorial on visual servo control. *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, cilt. 12, no. 5, 651–670, doi: 10.1109/70.538972.
- [3] Chaumette F. & Hutchinson S. (2006). Visual servo control. I. Basic approaches. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, cilt 13, no. 4, 82–90, doi: 10.1109/MRA.2006.250573.
- [4] Collewet C., Marchand E. & Chaumette F. (2008). Visual servoing set free from image processing. *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 81–86, doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543190.
- [5] Kallem V., Swensen J. P., Hager G. D. & Cowan N. J. (2007). Kernel-based visual servoing. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1975–1980.
- [6] Tahri O. & Chaumette F. (2005). Point-based and region-based image moments for visual servoing of planar objects. *IEEE Trans. Robot.*, cilt. 21, no. 6, 1116–1127, doi: 10.1109/TRO.2005.853500.
- [7] Bakthavatchalam M., Tahri O. & Chaumette F. (2018). A direct dense visual servoing approach using photometric moments. *IEEE Trans. Robot.*, cilt. 34, no. 5, 1226–1239, doi: 10.1109/TRO.2018.2830379.
- [8] Bateux Q. & Marchand E. (2017). Histograms-based visual servoing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, cilt. 2, no. 1, 80–87, 2017.
- [9] Bourquardez O., Mahony R., Hamel T. & Chaumette F. (2006). Stability and performance of image based visual servo control using first order spherical image moments. *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, 4304–4309, doi: 10.1109/IROS.2006.281963.
- [10] Malis E., Chaumette F. & Boudet S. (1999). 2 1/2 D visual servoing. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, cilt. 15, no. 2, 238–250, doi: 10.1109/70.760345.
- [11] Corke P. I.& Hutchinson S. A. (2001). A new partitioned approach to image-based visual servo control. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, cilt.17, no. 4, 507–515, doi: 10.1109/70.954764.
- [12] He Z., Wu C., Zhang S. & Zhao X. (2019). Moment-based 2.5-D visual servoing for textureless planar part

- grasping for textureless planar part grasping. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt. 66, no. 10, 7821–7830.
- [13] Chaumette F. (1998). Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing,” *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 66–78.
- [14] Kumar P. P. & Behera L. (2010). Visual servoing of redundant manipulator with Jacobian matrix estimation using self-organizing map. *Rob. Auton. Syst.*, cilt. 58, no. 8, 978–990, doi: 10.1016/j.robot.2010.04.001.
- [15] Kosmopoulos D. I. (2011). Robust Jacobian matrix estimation for image-based visual servoing. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, cilt. 27, no. 1, 82–87, doi: 10.1016/j.rcim.2010.06.013.
- [16] Zhong X., Zhong X. & Peng X. (2015). Robots visual servo control with features constraint employing Kalman-neural-network filtering scheme. *Neurocomputing*, cilt. 151, 268–277, doi: 10.1016/j.neucom.2014.09.043.
- [17] Gonçalves P. J., Mendonça L. F., Sousa J. M. C. & Pinto J. R. C. (2008). Uncalibrated eye-to-hand visual servoing using inverse fuzzy models. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, cilt. 16, no. 2, 341–353, 2008.
- [18] Mansard N. & Chaumette F. (2007). Task sequencing for high-level sensor-based control. *IEEE Trans. Robot.*, cilt. 23, no. 1, 60–72, doi: 10.1109/TRO.2006.889487.
- [19] Kermorgant O. & Chaumette F. (2014). Dealing with constraints in sensor-based robot control. *IEEE Trans. Robot.*, cilt. 30, no. 1, 244–257.
- [20] Chesi G., Hashimoto K., Prattichizzo D. & Vicino A. (2004). Keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing: A switching approach. *IEEE Trans. Robot.*, cilt. 20, no. 5, 908–913, doi: 10.1109/TRO.2004.829456.
- [21] Yoshikawa T. (1985). Manipulability of robotic mechanisms. *Int. J. Rob. Res.*, cilt. 4, no. 2, 3–9, 1985.
- [22] Zhao Z. Y., Tomizuka M., & Isaka S. (1993). Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, cilt. 23, no. 5, 1392–1398, doi: 10.1109/21.260670.
- [23] Mezouar Y. & Chaumette F. (2002). Path planning for robust image-based control. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, cilt. 18, no. 4, 534–549.
- [24] Chesi G. & Hung Y. S. (2007). Global path-planning for constrained and optimal visual servoing. *IEEE Trans. Robot.*, cilt. 23, no. 5, 1050–1060.
- [25] Gonzales R. C. & Woods R. E. (2008). *Digital Image Processing*, 3rd. Pearson.
- [26] Haykin S. (1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR.
- [27] Huang G., Zhou H., Ding X. & Zhang R. (2012). Extreme learning machine for regression and multiclass classification. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. B Cybern.*, cilt. 42, no. 2, 513–529.
- [28] Janabi-Sharifi F., Deng L. & Wilson W. J. (2011). Comparison of basic visual servoing methods. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, cilt. 16, no. 5, 967–983, 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2063710.

Araştırma Makalesi – Research Article

Farklı Anaçlar Üzerine Aşılı Şaraplık Üzüm Çeşitlerinde Fidan Randıman ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi

Seda Sucu^{1*}, Adem Yağcı²

Geliş / Received: 02/06/2020

Revize / Revised: 26/08/2020

Kabul / Accepted: 23/09/2020

ÖZ

Bağlarda filoksera zararlısının varlığından dolayı asma fidanı üretimi pratik ve ekonomik olarak aşılı ile yapılmaktadır. Asma fidanı üretiminde farklı anaç-çesit kombinasyonları fidan randıman ve kalitesini önemli derecede etkilemektedir. 2018 yılında yapılan bu çalışmada; Cabernet Sauvignon, Cabernet Franc, Merlot, Pinot Noir, Syrah ve Narince şaraplık üzüm çeşitleri; Kober 5BB, 110R, 1103P anaçları üzerine aşılınmış, tüplü asma fidanı olarak yetiştirilmiş ve kombinasyonlara göre fidan randıman ve kalitesi belirlenmiştir. Kombinasyonlara göre en yüksek fidan randımanı kendi kökü üzerine Narince (% 92.7) çeşidinden elde edilmiştir. Kalite parametrelerinden sürgün uzunluğu bakımından kendi kökü üzerinde Cabernet Sauvignon (46.2 cm), yaş-kuru sürgün ağırlığı bakımından Cabernet Sauvignon/1103P (17.1 g; 3.46 g), kök uzunluğu bakımından Merlot /110 R (18 cm), yaş-kuru kök ağırlığı bakımından Syrah/110 R (3.3 g; 0.21 g) kombinasyonları ön plana çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Aşılama, Kök, Sürgün, Randıman, Parafin*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: seda.sucu@gop.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5187-5048>)

Bahçe Bitkileri, Ziraat Fakültesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

²İletişim: adembaba06@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3650-4679>)

Bahçe Bitkileri, Ziraat Fakültesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Determination of Sapling Yield and Quality Characteristics of Grape Varieties Grafted on Different Rootstocks

ABSTRACT

Due to the presence of phylloxera in vineyards, the production of vine saplings is practically and economically made by grafted. Different rootstock-variety combinations in grapevine production significantly affect the yield and quality of sapling. In this study conducted in 2018, Cabernet Sauvignon, Cabernet Franc, Merlot, Pinot Noir, Syrah, and Narince wine grape varieties were grafted on Kober 5BB, 110R, 1103P rootstocks grown as scuba vines and sapling yield and quality were determined according to combinations. According to the combinations, the highest sapling yield was obtained from Narince (92.7%) variety on its root. Cabernet Sauvignon own root (46.2 cm) in terms of shoot length, among the quality parameters, wet-dry shoot weight Cabernet Sauvignon/1103 P (17.1 g; 3.46 g), root length in terms of Merlot/110 R (18 cm), wet-dry root weight Syrah /110 R (3.3 g; 0.21 g) combinations came to the fore.

Keywords- *Grafted, Root, Shoot, Final Take, Paraffin*

I. GİRİŞ

Asma (*Vitis vinifera* L.) dünyanın en eski kültür bitkilerinden birisidir. Avrupa kıtasına özgü olan bu tür, insanlık tarihi ile birlikte kıtalar arasında yayılmış ve yeni coğrafyalarda asma ailesine (*Vitis* ssp.) ait farklı türlerin belirlenmesi ile bağcılık kültürü zenginleşmiştir [1]. Asmanın meyvesi olan üzüm Dünyadaki en önemli meyvelerden birisidir. Bu durum üzümün dünyadaki meyveler arasında, alan ve üretim açısından ilk sırada yer alması ile kendini göstermektedir [2,3]. Üzümün önemli bir başka özelliği de değerlendirilme şekillerine göre farklı (sofralık, şaraplık-şıralık, kurutmalık) yetiştirilme koşullarına, damak tatlarına, uygulamalara, kültürlere hitap eden çeşitlere sahip olmasıdır [4].

Tarımsal açıdan bu derece önemli olan bir bitkinin çoğaltılması da oldukça önemlidir. Aşılama odunsu bitkilerde rutin olarak kullanılan bir çoğaltma tekniğidir [5,6]. Asma ekonomik ve pratik olarak aşı ile çoğaltılmaktadır. Önceleri kendi kökleri üzerine kolayca çoğaltılabilen asma bitkisi için filoksera zararlısının varlığı ile birlikte aşı ile çoğaltma zorunlu hale gelmiştir. Filoksera bağcılık açısından oldukça önemli bir zararlıdır ve *Vitis vinifera* L. ise filoksera zararlısına karşı oldukça duyarlıdır [7].

Bağcılıkta aşılama yetiştirilmek istenen çeşidin, Amerikan asma anaçları üzerine masa başında veya yerinde aşılınması ile gerçekleştirilmektedir [8]. Anaçlar; fidanın kök sistemini oluşturmaktadır. Her bir anacın su ve mineral emilimi farklıdır. Bu durum fizyolojik süreci ve dolayısıyla da asma verim ve kuvvetini de etkilemektedir [5, 9].

Anaç kullanımının birtakım avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Asma anaçlarının her birinin fizyolojik, biyokimyasal özellikleri farklı olduğu için direk ya da dolaylı olarak anaç-çeşit kombinasyonunu da etkiler.[9]. Aşılama anaç-çeşit uyumu; asmanın büyümesini, verimini, kanopisini, kuvvetini, meyve kalitesini ve bunun gibi birçok özelliğini etkilemektedir [10,11,12,13,14]. Bu nedenle anaçların ve çeşitlerin fizyolojik özelliklerinin bilinerek uygun anaç-çeşit kombinasyonunun seçilmesi oldukça önemlidir [15]. Ayrıca, anaçlar çeşidin ekonomik, karakteristik ve biyokimyasal özelliklerini de etkilemekte anaç-çeşit kombinasyon ilişkisi, toprak ve iklim özellikleri ile de son derece alakalı olmaktadır [16]. Aşılı asma fidanı üretimi birçok basamaktan oluşmaktadır ve bu aşamaların her biri fidan randıman ve kalite parametrelerini önemli derece de etkilemektedir. Bununla birlikte kullanılan bitkisel materyallerin özellikleri de randımanı etkilemektedir.

Farklı anaç- çeşit kombinasyonlarının denendiği birçok çalışma [16,17,18,19,20,21] mevcuttur. Yapılan bu çalışma ile farklı anaçlar üzerine aşılı şaraplık üzüm çeşitlerinde fidan randıman ve kalite özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

II.MATERYAL VE YÖNTEM

A. Materyal

Çalışma 2018 yılında Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi (TOGÜ) Ziraat Fakültesi'ne ait aşılama ünitesi ve seralarında yürütülmüştür.

Kalemler ve anaçlar Manisa Bağcılık Araştırma Enstitüsü'nden temin edilmiştir (Şubat-2018). Çalışmada şaraplık üzüm üretiminde oldukça önemli yere sahip olan Cabernet Sauvignon, Cabernet Franc, Merlot, Pinot noir, Syrah ve Narince şaraplık üzüm çeşitleri, 5BB, 110R ve 1103P anaçları üzerine aşılanmıştır.

B. Yöntem

Aşılama zamanına kadar geçen sürede çelikler ve kalemler %80-95 nem ve 0-4 °C' de soğuk hava deposunda muhafaza edilmiştir [23, 24, 25, 26]. Soğuk hava deposundan çıkarılan anaçlık çeliklerde göz köreltme işlemlerinin (15 Mart), ardından aşı zamanından hemen önce ise kaybedilen suyun kazandırılması adına anaçlık çelikler 2 gün, kalemlik çelikler ise 1 gün süre ile suda bekletilmişlerdir [8]. Daha sonra sırası ile kaybedilen suyun geri kazandırıldığı bitkisel materyale; 50 °C de 30 dakika sıcak su uygulaması (termoterapi), ardından masabaşı omega aşı yöntemi ile aşılama, parafinleme, katlama işlemleri uygulanmıştır (18-20 Mart).Belirtilen uygulamalara tabi tutulan fidanlar, ardından kaynaştırma odasına alınmıştır (nem oranı %85-95; sıcaklık: ilk 3 gün 28-29 °C, 15 gün 25-26 °C ve 3 gün 22-24 °C; havalandırma: 12 saatte bir saat). Kaynaştırma sonrası 2. parafinleme yapılan

fidanlar içlerinde torf:perlit (1:1 v/v) karışımı bulunan tüplere dikilerek (22 Nisan), dört- beş hafta boyunca sera ortamında büyümeleri sağlanmıştır [26, 27, 28, 29, 30] (Şekil 1, 2, 3 ve 4) .



Şekil 1. Anaçlık ve kalemlik çeliklerin suda bekletilmesi



Şekil 2. Masabaşı omega aşısı makinesi ile aşılama



Şekil 3. Aşılansmış olan anaç ve kalemlik çeliklerin talaş içinde katlama sandıklarına yerleştirilmesi



Şekil 4. Serada ortamında büyümekte olan tüplü asma fidanları

Dikilen fidanlar yaklaşık beş hafta boyunca gelişmeye bırakılmış olup sonrasında elde edilen fidanlarda aşağıdaki özelliklere bakılmıştır.

- Fidan randımanı (%): Fidan randımanına ait formül aşağıdaki gibidir (F.R; Fidan randımanı, D.F.S; dikilen fidan sayısı; Ç.F.S; Çıkan fidan sayısı);

$$FR = (DFS / \text{ÇFS}) \times 100 \quad (1)$$

- Kök uzunluğu (cm): Fidanlarda oluşan kökler, anaç gövdesinden kök uç kısmına kadar olan kök uzunlukları cetvel ile ölçülmüştür.
- Sürgün uzunluğu (cm): Fidanlarda oluşan sürgünlerin dip kısmından uç kısmına kadar olan sürgün uzunlukları cetvel ile ölçülmüştür.
- Sürgün-kök yaş ağırlığı (g): Fidan kökleri ve sürgünleri budama makası ile kesilmiş, yıkanmış ve gölge bir yerde bitki yüzey suyu kurutulmuş ve 0.01 g hassasiyetli terazide tartılarak belirlenmiştir.

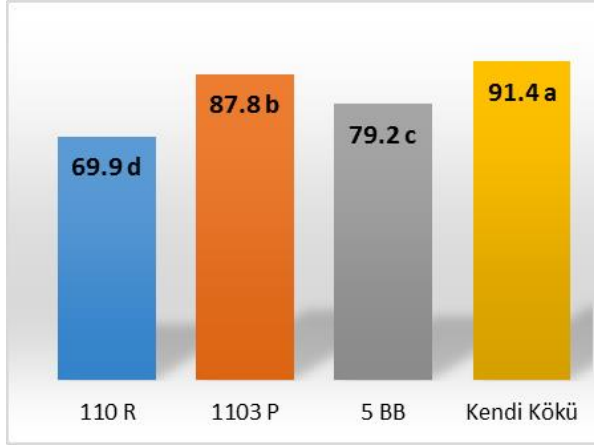
Sürgün-kök kuru ağırlığı (g): yaş ağırlıkları alınan kök ve sürgünler oda sıcaklığında 48 saat, daha sonra 65 °C sıcaklıkta etüv içinde sabit ağırlığa gelinceye kadar (~48 saat) bekletilmiş 0.01 g hassasiyetli terazide tartılmıştır.

1) *İstatistik Analiz:* Deneme bölünmüş parseller deneme desenine göre yapılmış olup elde edilen veriler varyans analizine tabii tutulmuş ve ortalamaların karşılaştırılmasında LSD testinden faydalanılmıştır. Çalışmada 4 anaç (kendi kökü dahil) x 6 çeşit x 3 tekrür x 30 çelik olmak üzere toplam 2.160 adet bitkisel materyal kullanılmıştır. Fidan randımanının belirlenmesi için bütün bitkisel materyaller dikkate alınırken sürgün ve kök ile ilgili parametrelerin belirlenmesinde, her tekrür için 10 adet fidan olmak üzere toplamda 720 fidan kullanılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

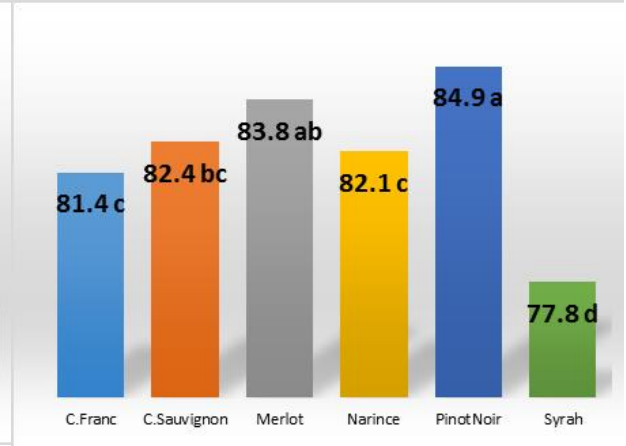
Gerçekleştirilen çalışmanın çeşit, anaç ve çeşit-anaç interaksyonuna ait fidan randıman ve kalite değerleri Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7, Çizelge 1, Çizelge 2 ve Çizelge 3 'de verilmiştir.

Toplam fidan randıman değerleri anaçlara, çeşitlere ve anaççeşit interaksyonuna göre önemli derecede etkilenmiştir. Çeşitler bazında fidan randımanı %77.8 (Syrah) ile %84.90 (Pinot noir) arasında olurken anaçlar bazında ise %69.90 (110 R) ile %91.40 (kendi kökü) arasında değişim göstermiştir. Anaç ve çeşit interaksyonuna bakıldığında ise kendi köklerinde yetişen Narince çeşidinde en iyi randıman yakalanırken (%92.70) 5BB üzerine aşılı Syrah çeşidinde en düşük randıman değeri elde edilmiştir (%68.10) (Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7).



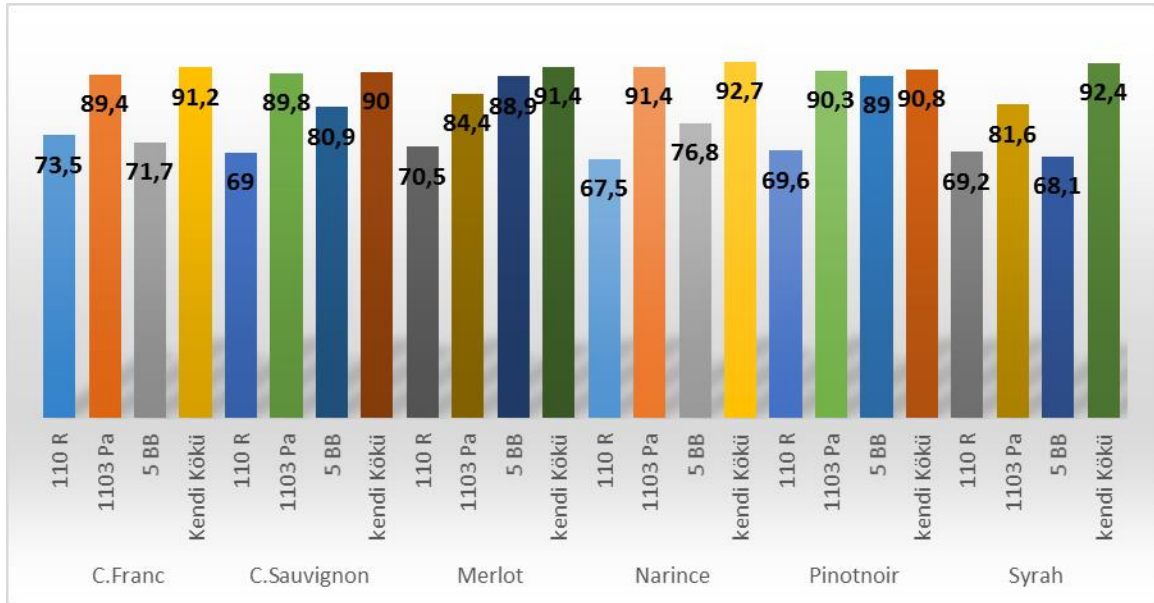
Şekil 5. Anaçlara ait toplam fidan randımanı

LSD_(0,05): 2.0



Şekil 6. Çeşitlere ait toplam fidan randımanı

LSD_(0,05): 1.5



Şekil 7. Anaç x çeşit kombinasyonlarına ait toplam fidan randımanı

Kalite parametreleri incelendiğinde çeşitler bakımından; en uzun sürgün değeri 44.10 cm ile Cabernet Sauvignon çeşidinde ölçülürken diğer çeşitler arasında fark meydana gelmemiştir. Çeşitlerin yaş ve kuru sürgün ağırlığı sırasıyla 2.39 g– 11.90 g (Cabernet Sauvignon) ile 1.39 g– 6.9 g (Narince) arasında; kök uzunluğu ile 9.60 cm (Cabernet Sauvignon) ile 14.50 cm (Syrah); yaş kök ağırlığı ise 1.50 g (Cabernet Franc) ile 2.80 g (Syrah) arasında değer almıştır (Tablo 1). Anaçlar baz alındığında yaş ve kuru sürgün ağırlığında 1103 P (2.22 g; 11.30 g) anaçı ön plana çıkarırken, yaş kök ağırlığı bakımından 110 R (2.30 g) anaçı ön plana çıkmıştır. Sürgün uzunluğu, kök uzunluğu, kuru kök ağırlığı bakımından rakamsal olarak farklılıklar olsa da bu farklar istatistik açıdan önem arz etmemiştir (Tablo 2). Fidan kalite parametrelerinden; kök uzunluğu açısından Merlot/1103 Pa kombinasyonu en yüksek (18 cm) değeri gösterirken Pinot-Noir/5BB kombinasyonu en düşük değeri (6.70 cm) göstermiştir.

Sürgün uzunluğu, yaş sürgün ağırlığı, kuru sürgün ağırlığı, yaş kök ağırlığı ve kuru kök ağırlığı bakımından farklar istatistiki açıdan önemli bulunmamıştır (Tablo 3).

Tablo 1. Çalışmaya konu olan çeşitlerin fidan kalite değerleri

Çeşit	Sürgün			Kök		
	Uzunluk (cm)	Ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Uzunluk (cm)	Ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)
C.Franc	31.8 b	7.7 bc	1.64 b	9.7 c	1.5 b	0.13
C.Sauvignon	41.4 a	11.9 a	2.39 a	9.6 c	1.6 b	0.13
Merlot	33.5 b	9.8 ab	1.81 ab	13.4 ab	2.0 ab	0.14
Narince	30.8 b	6.9 c	1.39 b	11.0 bc	1.5 b	0.11
PinotNoir	34.1 b	9.5 ab	1.83 ab	11.8 bc	1.8 b	0.12
Syrah	30.7 b	10.0 ab	1.79 b	14.5 a	2.8 a	0.19
LSD 0.05	6.7	2.5	0.6	2.5	0.8	ÖD

Aynı sütunda farklı küçük harfi alan çeşitler arası fark istatistiksel olarak önemlidir ($p<0.05$)

Tablo 2. Çalışmaya konu olan anaçların fidan randıman ve kalite değerleri

Anaç	Sürgün			Kök		
	Uzunluk (cm)	Ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Uzunluk (cm)	Ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)
110 R	31.9	10.1 ab	1.97 a	12.3	2.3 a	0.16
1103 P	36.1	11.3 a	2.22 a	11.6	2.1 a	0.15
5 BB	31.8	8.7 bc	1.79 a	10.3	1.6 ab	0.12
Kendi Kökü	35.2	7.1 c	1.25 b	12.4	1.5 b	0.11
LSD (0.05)	ÖD	2.2	0.5	ÖD	0.40	ÖD

Aynı sütunda farklı küçük harfi alan çeşitler arası fark istatistik olarak önemlidir ($p<0.05$)

Tablo 3. Çalışmaya konu olan çeşit anaç kombinasyonlarının kalite özellikleri

Çeşit	Anaç	Sürgün			Kök		
		Uzunluk (cm)	Ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Uzunluk (cm)	Ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)
C.Franc	110 R	24.3	5.9	1.40	10.0 c-e	1.7	0.18
	1103 Pa	30.9	7.8	1.73	10.0 c-e	1.4	0.11
	5 BB	33.4	9.2	2.06	10.0 c-e	1.9	0.13
	Kendi Kökü	38.7	7.9	1.36	8.0- de	1.1	0.09
C.Sauvignon	110 R	42.1	11.6	2.34	7.3 e	1.2	0.09
	1103 Pa	41.0	17.1	3.46	13.3 a-e	3.1	0.24
	5 BB	36.5	8.2	1.94	10.0 c-e	1.3	0.14
	Kendi Kökü	46.2	10.7	1.81	7.7 e	0.9	0.06
Merlot	110 R	35.2	12.0	2.36	18.0 a	3.0	0.23
	1103 Pa	36.0	9.2	1.60	8.3 de	1.4	0.08
	5 BB	32.4	11.2	2.07	16.7 a-c	2.1	0.12
	Kendi Kökü	30.2	6.9	1.22	10.7 b-e	1.6	0.11
Narince	110 R	27.9	7.3	1.32	8.7 de	1.3	0.07
	1103 Pa	37.8	11.1	2.28	11.7 a-e	2.3	0.16
	5 BB	23.8	5.0	1.11	8.0 de	1.2	0.12
	Kendi Kökü	33.8	4.0	0.85	15.7 a-c	1.2	0.09
Pinotnoir	110 R	31.4	10.8	2.19	13.0 a-e	3.3	0.20
	1103 Pa	39.5	11.1	2.21	10.0 c-e	1.5	0.08
	5 BB	35.5	9.9	1.88	6.7 e	1.3	0.09
	Kendi Kökü	29.9	6.1	1.02	17.3 ab	1.2	0.11
Syrah	110 R	30.4	13.0	2.20	16.7 a-c	3.3	0.21
	1103 Pa	31.4	11.7	2.05	16.0 a-c	3.0	0.20
	5 BB	28.9	8.5	1.67	10.7 b-e	2.1	0.15
	Kendi Kökü	32.2	6.9	1.24	14.7 a-d	2.8	0.20
LSD_(0.05)		ÖD	ÖD	ÖD	6.9	ÖD	ÖD

Fidan üretiminde üretimde randıman değerleri anaç ve çeşitlere göre değişebileceği birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir [31; 32; 33; 34]. Örneğin; Dardeniz ve Şahin çalışmalarında 5BB, 140Ru, 41B ve 1103P anaçları üzerine Uslu ve Yalova İncisi üzüm çeşitleri ile yaptığı çalışmada; en yüksek fidan randımanını 41B ve 5BB üzerine aşılı Uslu çeşidinde sırasıyla %44.61 ve %37.47 olarak belirlemişler ve farklılığın çeşit ve anaç kombinasyonlarına göre değişebileceğini vurgulamışlardır [17]. Ağaoğlu ve Çelik çalışmalarında Hafızali, Hamburg Misketi ve Hasandede üzüm çeşitlerini 5BB ve 99R anaçları üzerine aşılamışlardır. Toplam fidan randımanının %20–60 arasında değiştiğini belirlemişlerdir [26]. Yıldırım ve arkadaşları 41 B üzerine aşıladıkları çeşitlerde fidan randımanını Cabernet Sauvignon'da %60.30, Merlot'da %59.30, Boğazkere'de %57.80 ve Chardonnay'de %56.50 olarak elde etmişlerdir [35]. Baydar ve Ece (2005) yapmış oldukları çalışmalarında en yüksek fidan randımanı değerini Razakı/Kober 5 BB (%61.00), Razakı/SO4 (%59.00), Italia/SO4 (%58.00) ve Alphonse Lavallée/SO4 (%52.33) aşı kombinasyonlarından elde ederken, diğer kombinasyonlardan %11.33-34.00 arasında değişen oranlarda fidan randımanı elde edilmiştir [36]. Araştırmacılara göre fidan randımanlarının arasındaki farklılıklara; kullanılan çeşit ve anaçların farklılığı yanında, bitkisel materyalin alındığı/geldiği yer, bunların saklanma koşulları, aşılama ve katlama tekniği, parafinleme, harç materyalleri, bakım işlemleri vb. birçok faktör etki etmiş olabilir. Balcı ve Yağcı yaptıkları çalışmada fidan randımanında aşılama işlemi randımanı %7.50 oranında azalttığını bildirmektedir [37]. Bu çalışmada da kendi kökleri üzerinde elde edilen fidan randımanları bütün kombinasyonlarda daha yüksek bulunarak benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Fidan çalışmalarında kullanılan çeşit, anaç ve çeşit/anaç kombinasyonlarına göre; kuru kök ağırlıkları, stoma sayısı, kök gelişim düzeyi, odunlaşma düzeyi, aşı noktası kalınlıkları gibi parametrelerde [20, 24, 26, 38, 39, 40,] farklılıklar olabilmektedir.

5BB, 140Ru, 41B ve 1103P anaçları üzerine Uslu ve Yalova İncisi üzüm çeşitlerinin aşılandığı bir çalışmada sürgün uzunluğu bakımından çeşit anaç kombinasyonlarındaki fark istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur, bizim çalışmamızda da sürgün uzunluğu bakımından çeşitler açısından fark istatistiksel olarak önemli bulunurken anaçlar ve çeşit-anaç kombinasyonlarında önemli bulunmamıştır. Soltekin ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışma da 41 B anaç üzerine Sultan 1, Aktın Sultani ve Saruhan bey çeşitlerini aşılamış ve sıcaklık uygulamasının fidan randıman ve kalitesi üzerine etkilerine bakmışlardır. Yaptıkları çalışmada kullanılan kalite parametrelerinden sürgün uzunluğu, yaş-kuru kök ağırlığı bakımından farklar istatistiki açıdan önemli bulunmuştur [41]. Bizim çalışmamızda sürgün uzunluğu açısından yukarıda bahsedilmiştir. Diğer parametreler bakımından ise yaş kök ağırlığı bakımından çeşit ve anaç fidan kuru kök ağırlıklarındaki farklılık istatistiksel açıdan önemli, kök ağırlığı bakımından önemsiz bulunmuştur.

Yapılan bu çalışma ile yukarıda verilen çalışmalar uyum içerisinde olup; kullanılan anaç-çeşit kombinasyonlarına göre fidan randıman ve kalitesi değişebilmektedir.

IV.SONUÇ

Bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

- Fidan üretiminde çeşit-anaç kombinasyonuna göre fidan randımanı değişebilir.
- Aşılı fidanlarda bitkinin toprak üstü aksamını oluşturan çeşitler, sürgün gelişiminde esas rolü oynamaktadır. Fakat sürgün içerisindeki kuru maddeyi oluşturan bileşiklerin birikiminde sürgün yanında kök sistemini oluşturan anaçlarında önemli bir katkısı vardır.
- Fidanların kök uzunluğu ve yaş kök ağırlığı, üzerine aşılı çeşitler tarafından önemli derecede etkilenmektedir.
- Çeşitlerin kök uzunluğuna olan etkisi anaçlara ve çeşitlere göre farklılık gösterirken kök yaş ağırlığı anaçlara göre istatistik olarak değişim göstermemektedir.
- Kuru kök ağırlığı değeri, çeşitlere, anaçlara ve bunların interaksyonuna göre farklı olmaması fidanların kısıtlı bir alanda gelişmeye bırakılması nedeni ile olabilir. Nitekim bağ yerinde anaçların kök sistemlerinin farklı olması bilinen bir durumdur.

KAYNAKLAR

- [1] Kunter, B., & Keskin, N. (2018). Üzümün Antioksidan ve Ayurvedik Önemi, Uluslararası Avrasya Doğal Beslenme ve Sağlıklı Yaşam Zirvesi , Ankara, Türkiye, 12-15 Temmuz, pp.382-387.
- [2] Anlı, R. E. 2006. Bağlar Güzeli. İstanbul, Üzüm ve Üzüm Kültürü Yapı Kredi Yayınları, 238 sayfa.
- [3] Treutter, D. (2010). Managing phenol contents in crop plants by phytochemicalfarming and breeding-visions and constraints. *Int. J. Mol. Sci.* 11, 807–857.
- [4] Çelik, S. (2011). Bağcılık (Ampeloloji). Avcı Ofset, İstanbul, 428 s
- [5] Soar, C.J., Dry, P.R., &Loveys, B.R. (2006). Scion photosynthesis and leaf gas exchange in L. cv. Shiraz: mediation of rootstock effects via xylem sap ABA. *Aust. J Grape Wine Res.* 12, 82–96.
- [6] Koundouras, S., Hatzidimitriou, E., Karamolegkou, M., Dimopoulou, E., Kallithraka,S., Tsialtas, J.T., Zioziou, E., Nikolaou, N., &Kotseridis, Y. (2009). Irrigation and rootstock effects on the phenolic concentration and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv Cabernet Sauvignon grapes. *J. Agric. Food Chem.* 57, 7805–7813.
- [7] Jackson, D.I. & Lombard, P.B. (1993). Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality: a review. *American Journal of Enology and Viticulture* , 44, 409-430.
- [8] Çelik, H., Ağaoglu, Y.S., Fidan, Y., Maraslı, B. & Söylemezoğlu, G. (1998). Genel Bağcılık, Ankara, SunfidanA.Ş. Mesleki Kitaplar Serisi:1, 253 s.
- [9] Satisha, J., Ramteke, S.D., &Karibasappa, G.S. (2007). Physiological and biochemical characterisation of grape rootstocks. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 28, 163–168.
- [10] Ezzahouani, A., &Williams, L.E. (1995).The influence of rootstock on leaf waterpotential, yield, and berry composition of Ruby seedless grapevines. *Am. J.Enol. Vitic.* 46, 559–563.
- [11] Koundouras, S., Tsialtas, I.T., Zioziou, E., &Nikolaou, N. (2008). Rootstock effects on the adaptive strategies of grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Cabernet–Sauvignon) undercontrasting water status: leaf physiological and structural responses. *Agric.Ecosyst. Environ.*, 128, 86–96.
- [12] Jones, H. G. (2012). How do rootstocks control shoot water relations? *New Phytologist*, 194 (2), 301-303.
- [13] Tecchio, M.A., Paioli-Pires, E.J., Terra, M.M., Teixeira, L.A.J., &Leonel, S. (2013). Característicasfísicas eacúmulo de nutrientespeloscachos de ‘NiagaraRosada’ em vinhedosnaregião de Jundiá. *RevistaBrasileira de Fruticultura*, 29, 621-625.
- [14] Souza, C.R., Mota, R.V., França, D.V.C., Pimentel, R.M.A., & Regina, M.A. (2015). Performance of Cabernet Sauvignon grafted onto different rootstocks during the autumn-winter season in Brazilian southeast. *Scientia Agricola*, 72, 138-146.
- [15] Martinez-Ballesta., M. C., Alcaraz-Lopez C., Muries B., Mota-Cadenas C., & Carvajal M. (2010). Physiologicalaspects of rootstockscioninteractions. *Sci. Hortic.* 127, 112–118.
- [16] Vršič, S., Pulko, B., &Kocsis, L. (2016). Effects of rootstockgenotypes on compatibility, biomass, andtheyield of Welschriesling Vol. 43, 2016 (2), 92–99.

- [17] Dardeniz, A. & Şahin, A.O. (2005). Aşılı asma fidanı üretiminde farklı çeşit ve anaç kombinasyonlarının vejetatif gelişme ve fidan randımanı üzerine etkileri. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, *Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Dergisi*, Bahçe. 43 (2), 1–9.
- [18] Bahar, E., Korkutal, İ., &Kök, D. (2008). Hidroponik Kültür ve Fidanlık Koşullarında Yetiştirilen Aşılı Asma Fidanlarının Karbonhidrat Ve Azot İçerikleri İle Bağdaki Tutma Performansları Üzerine Araştırmalar *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(1), 15-26.
- [19] Çakır, A., Karaca, N., Sıdfar, M., Baral, Ç. & Söylemezoğlu, G. (2013). Sultani Çekirdeksiz Üzüm Çeşidinin Farklı Amerikan Asma Anaçları ile Aşı Tutma Oranının Belirlenmesi *YYÜ Tar Bil Derg (YYU)J AgrSci* 23(3), 229-235.
- [20] Şen, A. & Yağcı, A. (2016). Tüplü Asma Fidanı Üretiminde Farklı Köklendirme Yerlerinin Fidan Randımanı ve Kalitesi Üzerine Etkileri. *Meyve Bilimi* 3(1), 22-28.
- [21] Sucu, S. & Yağcı, A. (2017). Bazı Asma Anaçları ve Bu Anaçlar Üzerine Aşılı Sultani Çekirdeksiz Çeşidinde Fidan Randımanı ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi *Ege Üniv. Ziraat Fak. Derg.*,54 (1), 53-59.
- [22] Çelik, H. (2006). Üzüm Çeşit Kataloğu. Ankara. Sun Fidan AŞ Mesleki Kitaplar Serisi:3, 165 s.
- [23] Becker, H. (1971). Neure Ergebnisse aus Untersuchungen Über die Techonologie der Lagerung van Rebenvermehrung. Probleme der Rebenveredlung, *Heft*. 8, 29-48.
- [24] Gerhard, R., Cheng–Yung, C. & Schneider, F. (1971). Probleme Der Reben-Veredlung. *Heft* 8, 9-27.
- [25] Sievers, E. (1971). Neue Wege bei der Versongang der Rebenveredlung mit Edelreis material. *Weinberg und Keller*, 18,253-279.
- [26] Ağaoğlu, Y.S &Çelik, H. (1978). Bazı Amerikan Asma Anaçlarında Ethrel Uygulamaları ve Dikim Şekillerinin Köklenme Üzerine Etkileri. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yıllığı*, Cilt:27
- [27] Hamilton, R. (1997). Hot Water Treatment of Grapevine Propagating Material. *The Australian Grapegrower Winemaker*, 400,21-22.
- [28] Çelik, H. (1983). Sera Koşullarında Tüplü Asma Fidanı Üretimi, Türkiye II. Bağcılık ve Şarapçılık Sempozyumu, Manisa s, 3-8. Türkiye I.Fidancılık Sempozyumu Bildirileri s. 52.
- [29] Akman, İ. & Ilgın, C. (1987). Tüplü Fidan Üretiminde Başarıyı Etkileyen Faktörler, *TÜBİTAK Türkiye I.Fidancılık Sempozyumu Bildirileri*, s. 52.
- [30] Aslan, K.A., Özcan, S., Kösetürkmen, S., Yağcı, A., Sakar, E., Bekişli, M.İ. &Kılıç, D. (2015). Gaziantep İli Asma Fidanı Üretiminde Farklı Çeşit/Anaç Kombinasyonlarının Karşılaştırılması. *Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*A. 27 (1), 210-216.
- [31] Cangi, R., Doğan, A., Balta, M. & Yarılgaç, T. (1999). Aşılı Asma Fidanı Üretiminde Farklı Parafin Uygulamalarının Aşı Kaynaşmasının Seyri ve Fidan Randımanı Üzerine Etkileri. *Türkiye III. Ulusal Bahçe Bitkileri KongreKitabı*, 983-988.
- [32] Cangi, R., Balta, F., &Doğan, A. (2000). Asılı Asma Fidanı Üretiminde Kullanılan Katlama Ortamlarının Fidan Randımanı ve Kalitesi Üzerine Etkilerinin Anatomik ve Histolojik Olarak İncelenmesi *Turk J Agric For* 24, 393–398.

- [33] Yağcı, A., Alpaslan, K., & Özcan, S. (2016). *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 33 (2), 125-134.
- [34] Günen, E. & Altındışli, A. (2017). Cabernet Sauvignon Üzüm Çeşidinin Bazı Amerikan Asma Anaçları ile Aşu Kombineasyonlarının Örtü Altı ve Açıkta Yetiştiricilik Koşullarında Tüplü Fidan Performanslarının Değerlendirilmesi. *Ege Üniv. Ziraat Fak. Derg.* 54 (1), 91-99.
- [35] Yıldırım, M., Dardeniz, A., Gökbayrak, Z., Türkmen, C., Yıldırım, F., & Tunçel, R. (2011). Farklı üzüm çeşitlerindeki üniform kültürel uygulamaların aşılı asma fidanı randıman ve gelişimi üzerine etkileri. *Çanakkale Tarımı Sempozyumu Kitapçığı (Dünü, Bugünü ve Geleceği)*, 434-442.
- [36] Baydar, N.G., & Ece, M. (2005). Isparta Koşullarında Aşılı Asma Fidanı Üretiminde Farklı Çeşit/Anaç Kombineasyonlarının Karşılaştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (3).
- [37] Balcı, M., & Yağcı, A. (2018). Asma Fidanı Üretiminde Ön Bekletme ve Alttan Isıtma Uygulamalarının Randıman ve Kalite Üzerine Etkileri *Bahçe 47 (Özel Sayı 1: Türkiye 9. Bağcılık Ve Teknolojileri Sempozyumu)*, 393-400.
- [38] Fidan, Y., & A. Eriş. (1972). Bazı Önemli Sofralık ve Şaraplık Üzüm Çeşitlerinde Bir Senelik Dalların Özellikleri Üzerinde Araştırmalar. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fak. Yıllığı* Yıl:22, Fasikül:3-4, 1972.
- [39] Kısmalı, İ., & Karakır, N. (1990). Asma Fidanı Elde Edilmesinde Kalite ve Randıman Arttırma Olanakları Üzerinde Araştırmalar. *Doğa, Tarım ve Ormanlık Dergisi*, 14, 107-115.
- [40] Çelik, S., Delice, A. & L. Arın. (1991). Fidanlık Koşullarında Aşılı Köklü Asma Fidanı Üretimi. *Doğa-Tr. J. of Agricultural and Forestry* 16 , 507-518.
- [41] Soltekin, O., Savaş, Y., Özcan.T. E., & Kacar, E. (2017). Termoterapi Uygulamasının Tüplü Aşılı Asma Fidanı Üretiminde Fidan Randıman ve Kalitesi Üzerine Etkileri. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 4, (1), 30-39.

Araştırma Makalesi - Research Article

Kaya Yünü Mineral Elyaf ve Mika Takviyeli Poliamid-6 Kompozitinin Termoset Polyester Kompozit Diske Karşı Aşınma Davranışları

Hüseyin Ünal^{1*}, Salih Hakan Yetgin²

Geliş / Received: 21/02/2020

Revize / Revised: 04/07/2020

Kabul / Accepted: 04/07/2020

ÖZ

Elektrik sektöründe kullanma amaçlı gerçekleştirilen bu çalışmada ağırlık olarak % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf (KYME) ve mika takviyeli poliamid-6 (PA-6) termoplastik esaslı polimer kompozitler, termoset esaslı kompozit disk yüzeyine karşı aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Çalışmanın amacı elektrik sektörü için aşınma direnci daha iyi olan polimer kompozit malzeme ile termoset doymamış polyester kompozit çiftini belirlemektir. Tribolojik deneyler disk üzerinde pim düzeneği bulunan bir aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Karşı disk malzeme olarak ağırlık olarak % 40 kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozit malzemesi kullanılmıştır. Tribolojik testler, 0,5 m/s kayma hızında 0,707, 1,415, 2,123 ve 3,538 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan tribolojik çalışmalar sonucunda en düşük aşınma oranı 1.98×10^{-14} m²/N değeri ile %20 oranında mika takviyeli PA-6 kompozitinde elde edilmiştir. Mika takviyeli PA-6 kompoziti kaya yünü mineral elyaf takviyeli kompozite göre yaklaşık olarak % 42 oranında daha az aşındığı belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elektriksel uygulamalarda kullanım amaçlı üretilen kompozit malzemelerden % 20 mika takviyeli PA-6 kompoziti ile %40 kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozit malzeme çifti elektrik kontak kesicilerde kullanılabilecek en uygun malzeme olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Kaya Yünü Mineral Elyaf, Mika, PA-6, Triboloji, Uygulanan Basınç*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: unal@subu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0521-6647>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye

²İletişim: shyetgin@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6068-9204>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mersin, Türkiye

Wear Behavior of Rockforce Mineral Fiber and Mica Reinforced Polyamide-6 Composite against Thermoset Polyester Composite Disc

ABSTRACT

In this study carried out for use in the electricity industry, 20 % by weight of rock wool mineral fiber and mica reinforced polyamide-6 (PA-6) thermoplastic based polymer composites were investigated against the thermoset-based composite disc surface. The aim of the study is to determine the polymer composite with better wear resistance and thermoset unsaturated polyester composite pair for the electricity sector. Tribological experiments were carried out on a pin-on-disc wear test apparatus. 40 wt.% calcium carbonate and 25wt.% long glass fiber reinforced unsaturated polyester composite material were used as a counter disc material. Tribological tests were carried out at sliding speed of 0.5 m/s and under the pressure of 0.707, 1.415, 2.123 and 3.538 MPa. As a result of the tribological studies, the lowest wear rate was obtained in PA-6 composite with 20 wt.% mica with the value of $1.98 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$. Mica reinforced PA-6 composite was found to be approximately 42 % less wear than rock force mineral fiber reinforced composite. As a result of the study, 20 wt.% mica reinforced PA-6 composite, which is produced for use in electrical applications, has been determined as the most suitable material to be used in electrical contact breakers with 40 wt.% calcium carbonate and 25 wt.% long glass fiber reinforced unsaturated polyester composite material.

Keywords- *Rockforce Mineral Fiber, Mica, PA-6, Tribology, Pressure*

I. GİRİŞ

Poliamid 6 (PA-6), yüksek dayanım/ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci, UV ve gama ışınlarına direnç, geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında basit ve ekonomik üretim prosesleri nedeniyle başta fiber olmak üzere ambalaj, otomotiv, elektrik/elektronik, tekstil ve makine sektörlerinde geniş bir şekilde kullanım alanı bulan yarı-kristal bir polimer türüdür. Ancak, poliamidlerin mekanik özelliklerin sınırlı olması, yüksek nem alma özelliği, düşük sıcaklıklarda düşük darbe dayanımına sahip olması ve kolay yanabilmesi gibi özellikleri kullanım alanlarını sınırlamaktadır [1-9]. Bu nedenle, katkısız poliamidin özellikleri farklı katkıları kullanılarak geliştirilebilmektedir. Genel olarak, poliamid esaslı termoplastik polimerlerde partikül formunda olan talk, kaolin, mika, wollastonit, grafit gibi katkıları kullanılırken elyaf formunda ise cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf gibi mukavemet artırıcılar geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu katkıların içerisinde cam elyaf, düşük maliyet, yüksek kimyasal direnç, üstün yalıtım özellikleri, kolay üretilebilmesi ve temin edilebilmesi nedenleriyle en çok tercih edilen elyaf türüdür. Literatür incelendiğinde katkısız poliamid polimerinin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine elyafın etkisinin incelendiği birçok çalışma olup, bu çalışmalarda mekanik ve tribolojik özellikleri geliştirdiği belirtilmiştir [1,10-14]. Jawali ve arkadaşları [15] ergiyik karıştırma yöntemi ile ürettikleri % 15, 30, 40 ve 50 oranlarında kısa cam elyaf takviyeli PA-6 polimer kompozitlerin çekme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Yüksek elastiklik modülü değerine sahip elyafın artması ile çekme dayanımı ve çekmedeki elastiklik modülünün önemli oranda arttığı belirtilmiştir. Artan yük ve kayma hızı ile birlikte aşınma oranı artarken PA-6 polimerine ilave edilen cam elyaf oranının artırılması ile birlikte aşınma miktarının önemli oranda azaldığı belirtilmiştir. Nuruzzaman ve arkadaşları [16] farklı oranlarda cam elyaf takviyesi ile ürettikleri PA-6 esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda poliamid bünyesindeki cam elyaf oranının artmasına bağlı olarak kompozit malzemelerin elastiklik modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kırılma dayanımının arttığını ancak gerininin ise azaldığını belirtmişlerdir. Yi-Lan ve arkadaşları [17] ise PA-6 polimerine ilave ettikleri grafit, yüksek yoğunluklu polietilen, talk ve cam elyaf gibi katkıların tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, cam elyaf katkının, PA-6 polimerinin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azalttığını belirtmişlerdir.

Kaya yünü mineral elyaf, Lapinus tarafından üretilen taş yünü ürünlerinden birisidir ve sertliği, çekme dayanımı, kırılma ve kopma uzaması gibi özellikleri cam elyaf katkısı ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Kaya yünü mineral elyafın PA-6 polimerine ilave edilmesi ile daha az aşınma, daha az viskozite artışı, daha az yanma oranı, yüksek yüzey kalitesi, yüksek ölçü kararlılığı ve bileşimin daha esnek olması gibi özellikler elde edilebilmektedir[18]. Ünal ve arkadaşları [18] kaya yünü mineral elyaf ve cam elyaf katkılı PA-6 kompozitlerin mekanik ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, kaya yünü mineral elyaf ve cam elyaf, % 10 ile 30 arasında değişen oranlarda tekli ve karışım halinde PA-6 polimerine ilave edilmiştir. Artan cam elyaf oranı ile çekme dayanımı, elastiklik modülü, eğme dayanımı ve eğmedeki elastiklik modülü artarken kaya yünü mineral elyaf katkısının mekanik özellikler üzerinde fazla etkili olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca darbe dayanımının katkı miktarı ile değiştiği % gerininin ise azaldığı belirtilmiştir.

Plaka benzeri kristal yapıya sahip mika minerali ise mükemmel mekanik, termal, elektrik yalıtımı, tribolojik özellikler ve polimer malzemelerden daha ucuz olması nedeniyle polimer kompozit malzeme üretiminde dolgu elemanı olarak en çok tercih edilen minerallerden birisidir [4, 19-20]. Lubomir ve arkadaşları [20] farklı oranlarda mika ve wollastonit katkılı yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) polimerinin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında mika katkısı ile üretilen YYPE esaslı kompozit malzemenin elastiklik modülü ve üst akma dayanımı değerleri artarken kopmadaki % gerinim ve kırılma tokluğunun azaldığını belirtmişlerdir. Mika katkılı YYPE polimerinin ergime sıcaklığı yaklaşık 3 °C azalırken kristallenme oranının ise yaklaşık % 30.2 oranında arttığı belirtilmiştir. Bose ve arkadaşları [5] çift vidalı ekstrüzyon kullanarak ürettikleri farklı partikül boyutlarına sahip ve farklı oranlarda (% 5-40) mika katkılı PA-6 esaslı kompozitlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda artan mika oranına bağlı olarak kompozitlerin çekme dayanımının, eğme dayanımının, çekmedeki ve eğmedeki elastiklik modülünün arttığı, % gerinim ve darbe dayanımlarının ise azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, mika partikül boyutunun azalması ile kompozit malzemelerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin arttığını belirtmişlerdir. Ünal ve Mimaroglu [21] yaptıkları çalışmada kısa cam elyaf ve lamel partikül şekilli mika katkıları PA-6 polimerine değişik oranlarda katarak kompozit malzemeler üretmişler ve kompozitlerin mekanik özelliklerine mika ve cam elyaf katkıların etkisini incelemişlerdir. Mika ve cam elyaf katkıları poliamid-6 polimer matrisine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında ilave edilmiştir. Çalışma sonucunda cam elyaf ve

mika katkılarının kompozitin çekmedeki ve eğmedeki elastiklik modülleri önemli derecede arttığını gözlemişlerdir. Ancak kompozitlerin çekme dayanımı ve eğme dayanımı değerleri mika oranının artmasından fazla etkilenmediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, artan mika oranı ile kompozit malzemelerin darbe dayanımının ve % gerinim değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Gan ve arkadaşları [22] ağırlıkça farklı oranlarda (% 0-40) mika katkılı poli-aril-eter-keton (PAEK) kompozitlerin mekanik özelliklerini ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Mika oranının artması ile kompozit malzemelerin çekme dayanımı ve çekmedeki elastiklik modülünün arttığını ancak % gerinimin azaldığını belirlemişlerdir. Aşınma testleri sonucunda ise yükün artmasına bağlı olarak kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. 50 N yük altında yapılan triboloji deneylerinde kompozit malzemedeki mika oranına bağlı olarak sürtünme katsayısı ile aşınma miktarının değişmediği ancak kompozit malzemeye uygulanan yükün 100 N veya 200 N' a çıkarıldığı durumlarda %20 mika katkı oranına kadar sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığını tespit etmişlerdir. % 20 mika oranından daha fazla mika ilavesi durumunda ise kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda Gan ve arkadaşları, kompozit bünyesindeki mika katkı oranının artması ile malzemenin rijitliğinin arttığını belirlemişlerdir. Bunun sonucu olarak ta kompozit malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığını belirlemişlerdir. Tribolojik uygulamalarda genellikle bir polimer veya kompozit malzeme ile bir çelik malzeme kullanılır. Literatürde bu duruma oldukça fazla rastlanmaktadır [23-26]. Ancak, endüstriyel uygulamaların birçoğunda birbiri ile temaslı çalışan polimerlere veya polimer kompozitlere oldukça fazla rastlanmasına rağmen literatürde bu konuda oldukça az çalışmaya rastlanmaktadır [4, 27]. Unal ve arkadaşları [4] pim-disk aşınma cihazı kullanarak farklı oranlarda (% 0-30) mika katkılı PA-6 kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında karşı disk malzeme olarak iki farklı poliamid-6 esaslı kompozit malzeme kullanmışlardır. Bu disk malzemelerden birisi ağırlık olarak %30 oranında mika katkılı PA-6 polimer kompoziti, diğeri ise yine ağırlık olarak %30 oranında cam elyaf takviye edilmiş PA-6 kompozit malzemesidir. Çalışma sonucunda Unal ve arkadaşları her iki polimer kompozit disklere karşı yapılan aşınma ve sürtünme deneylerinde artan mika oranına bağlı olarak kompozitlerin sürtünme katsayısının ve aşınma oranının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca uygulanan yük artışına bağlı olarak da mika katkılı poliamid-6 esaslı kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Demir [27] ise ağırlık olarak % 20 oranında mika katkılı PA-6 polimer kompoziti (PA-6+%20Mika) ile %20 oranında kısa cam elyaf takviyeli polisülfon (PSU+%20CE) polimer kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında karşı disk malzeme olarak iki farklı malzeme kullanmıştır. Bunlardan birisi AISI 316L paslanmaz çelik disklerdir. Diğeri ise % 30 cam elyaf takviyeli poli-fenilen-sülfid (PSU+%30CE) polimer kompozitidir. Tribolojik test çalışmalarını 0.5 m/s kayma hızında ve 10 N, 20 N ve 30 N yükler altında yapmıştır. Karşı disk olarak paslanmaz çelik kullanılması durumunda, PA-6+%20Mika ve PSU+%20CE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri azalırken PPS+30CE diske karşı çalışması durumunda ise sürtünme katsayısının pek değişmediği ancak aşınma oranı değerlerinin ise arttığı belirtilmiştir. Bu çalışma literatürde oldukça az karşılaşılan kaya yünü mineral elyafın PA-6 esaslı kompozit malzemenin özelliklerine etkisini belirlemek, geleneksel olarak kullanılan mika katkısı ile kıyaslamak ve endüstriyel uygulamalarda elektrik sektöründe kullanma amaçlı elektrik kontak kesicilerde kullanılabilirliğini belirlemektir. Ayrıca elektrik sektöründe birbiri üzerinde çalışan malzemelerden birisi yüksek sıcaklıklara dirençli, nem alma özelliği oldukça düşük, elektriksel yalıtkan ve kimyasallara direnç özellikleri ön plana çıkan kalsiyum karbonat katkılı ve cam elyaf takviyeli termoset esaslı polyeester kompozit malzemesidir. Bu malzeme bu tarz çalışmalarda vazgeçilmezdir. Bu amacı gerçekleştirmek için yapılan çalışmada aşınma ve sürtünme deneylerinde karşı disk malzeme olarak kalsiyum karbonat katkılı ve cam elyaf takviyeli termoset esaslı polyeester kompozit malzeme kullanılmıştır. Bu çalışma alanı oldukça spesifik olduğu için literatürde buna benzer bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada, ağırlık olarak ayrı ayrı % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf takviyeli poliamid-6 kompoziti ve mika katkılı poliamid-6 (PA-6) polimer kompozitlerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra üretilen kompozit malzemelerin kalsiyum karbonat katkılı ve cam elyaf takviyeli termoset esaslı polyeester kompozit disk yüzeyine karşı aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Tribolojik deneyler kuru kayma şartlarında ve oda sıcaklığında disk üzerinde pim düzeneği bulunan bir aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik testler, 0.5 m/s kayma hızında 0.707, 1.415, 2.123 ve 3.538 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan deney şartlarında, % 20 kaya yünü mineral elyaf katkılı PA-6 kompoziti ile % 20 mika katkılı PA-6 kompozit malzemeleri elektrik kontak kesicilerde kullanabilmek için, vazgeçilmez özelliği olan termoset esaslı doymamış polyeester kompozit malzemesine karşı çalışacak en uygun poliamid-6 esaslı kompozit malzeme araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada tribolojik deneylerde vazgeçilmez özelliği olan ağırlık olarak % 40 oranında kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli termoset polyester esaslı kompozit malzeme, karşı disk malzeme olarak kullanılmıştır. Karşı disk malzemeyi üretmek için Poliya Polyester, İstanbul firmasından doymamış polyester satın alınmıştır. 13 µm çaplı ve 12 mm boyundaki uzun cam elyaflar, Cam Elyaf Sanayi, İstanbul'dan, 10 µm partikül boyutlu kalsiyum karbonat dolgu maddesi ise Omya Madencilik firması, İstanbul'dan temin edilmiştir. Termoplastik esaslı ana matris polimer malzeme olarak Domamid H27 ticari kodlu orta akışkanlıkta poliamid-6 kullanılmış olup Domopolimer firmasından temin edilmiştir. Poliamid-6 polimerinin çekme mukavemeti 69 MPa, elastiklik modülü 2012 MPa ve darbe mukavemeti ise 17,5 kJ/m² dir. Elektriksel uygulamada kullanılacak olan kompozit malzemenin elektriksel yalıtkanlığını ve mukavemetini artırmak için ise mika katkı malzemesi kullanılmıştır. Mika katkı malzemesi, 2,84 g/cm³ yoğunluğunda ve 10 µm ortalama partikül boyutundadır. Micro Mica W ticari kodu ile Knarrevik firması Norveç'ten temin edilmiştir. Mika katkılı ve kaya yünü elyaf takviyeli PA-6 esaslı kompozit malzemeler ayrı ayrı NR-II tip ikiz vidalı bir ekstruderde homojen olarak karıştırılarak granül formunda üretilmiştir. Granül üretilirken ekstruder ısıtıcı sıcaklıkları besleme tarafından kalıba doğru 200-245 °C aralığında ayarlanmıştır. Ekstruderde üretilen granüller kullanılarak enjeksiyon makinasında çekme, darbe ve aşınma test numuneleri basılmıştır (Bakınız Şekil 1). Çekme test numuneleri ASTM D 637 standardına uygun olarak üretilmiş ve deneylerde Zwick Z020 model çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme deneyleri, 23±2 °C oda sıcaklığında, % 50±2 nem şartlarında 5 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde numunelerin çekme mukavemeti, elastiklik modülü ve % gerinim değerleri tespit edilmiştir. Çekme deneylerinde elde edilen veriler kullanılarak kompozit malzemenin çekme mukavemet değerleri Eşitlik 1'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Formülde F; uygulanan kuvvet (N), A ise numunenin ilk kesit alanı (mm²)'dir.

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

% gerinim ise Eşitlik 2'de verilen formülle hesaplanmış ve kısaca %e simgesi ile gösterilmektedir. Formüldeki L_k; numunenin koptuğu andaki son boyu (mm), L_o ise numunenin başlangıçtaki ölçü boyudur. (mm)

$$\%e = \left(\frac{L_k - L_o}{L_o} \right) \times 100 \quad (2)$$

Test numunelerin rijitliklerini belirlemek için elastiklik modülü değerleri tespit edilmiş ve Eşitlik 3'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Bu formülde E; elastiklik modülü (N/mm²), σ; test numunesinin elastik bölgedeki herhangi bir andaki mukavemeti (N/mm²) ve e; elastik bölgede gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirmedir.

$$E = \left(\frac{\sigma}{e} \right) \quad (3)$$

Darbe test numuneleri ise ASTM D256 standardına uygun olacak şekilde 4x10x80 mm³ boyutlarında enjeksiyonda basılmıştır (bakınız Şekil 1). Daha sonra numunelerin 10 mm olan kısmının ortasına 2 mm derinliğinde 45° açılı çentik açılmıştır. Darbe testleri için izod darbe testi yöntemi kullanılmıştır. Deneylerde numunelerin darbe enerjisi joule cinsinden belirlenmiş olup elde edilen değer, numunenin çentikten sonra kalan alanına bölünerek izod darbe mukavemeti değeri cihaz tarafından otomatik olarak belirlenmiştir. Sertlik deneyleri için ASTM D2240 standardı kullanılmış ve Shore D sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylere başlamadan önce test numuneleri 23 °C oda sıcaklığında ve % 50 nem şartlarında 24 saat süre ile kondüsyonlanmıştır. Deneyde kullanılan pim numuneleri 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda olacak şekilde basılmıştır (bakınız Şekil 1). Enjeksiyon makinesinde numuneleri basabilmek için makinenin enjeksiyon basıncı 1000 MPa, ısıtıcı sıcaklıkları 220-255 °C aralığında ve kalıp sıcaklığı ise 50 °C olarak ayarlanmıştır. Doymamış polyester esaslı termoset kompozitler, Sakarya'da Federal Elektrik firmasının desteği ile firma bünyesinde

üretimiştir. Polyester esaslı termoset kompozitler üretmek için önce doymamış polyester akışkanlığı sağlayıcı stiren ile 100:25 oranında karıştırılmıştır. Sonra çapraz bağlama ajanı olarak metil-etil-keton-peroksit (MEKP), geciktirici olarak BC500, stabilizatör olarak çinko sterat ve yoğunlaştırıcı olarak ise magnezyum oksit, viskozite azaltıcı ve renklendiricilerin tamamı 10 dakika süre ile karıştırıcıda karıştırılmıştır. Sonrasında elde edilen hamur karışımı Z-tipi bir karıştırıcıya alınıp kalsiyum karbonat ilave edilerek 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonrasında ise uzun cam elyaflar ilave edilerek 15 dakika karıştırılmıştır. Hazırlanan hamur karışımı, disk malzeme üretmeden önce 7 gün boyunca şartlandırılmıştır. Disk malzemeler 120 mm çaplı ve 10 mm kalınlığında olacak şekilde kalıpta 1500 MPa basınç altında, 150 °C sıcaklıkta 60 saniye boyunca kürlenmiştir.

Kompozit malzemelerin aşınma deneyleri, kuru ortam şartlarında, oda sıcaklığında ve Şekil 2’de şematik resmi verilen pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her tribolojik test öncesi disk ve pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur. Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan malzemeler için çalışma ortam sıcaklığı, uygulanan basınç, kayma hızı ve yüzey pürüzlülüğü gibi test şartları verilmiştir. Her testten önce (m_1) ve sonra (m_2) pim ağırlıkları ölçülmüş ve ağırlık kaybı (Δm) tespit edilmiştir ve Eşitlik 4’de verilen formül ile spesifik aşınma oranları (K_o) hesaplanmıştır. Formülde, Δm ; aşınma deneyi önceki ve sonraki ağırlıklar arasındaki fark ($m_1 - m_2$) yani ağırlık kaybı (g), L; kayma mesafesi (m), ρ ; malzemenin yoğunluğu (g/cm^3) ve F; uygulanan yük (N)’ tür.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (4)$$

Tablo 1. Tribolojik test parametreleri

Parametreler	Değerler
Normal basınç (MPa)	0.707, 1.415, 2.123, 3.538
Hız (m/s)	0.50
Test sıcaklığı (°C)	22±2
Nem (%)	59±2
Kayma yolu (m)	1000
Yüzey pürüzlülüğü (Ra, μm)	0.75-0.90

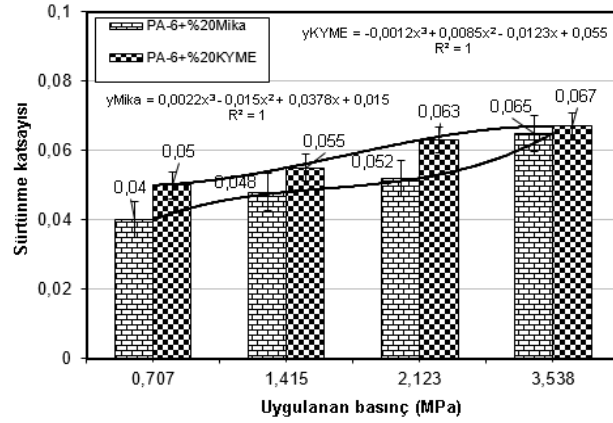
Deneylerde kullanılan malzemelerin sürtünme katsayısı hesabı için bir elektrik motorunun tahriki ile dönen diskin üzerine deneylerde kullanılan disk malzemeler bir vida yardımıyla sabitlenmiştir. Kol üzerinde bulunan bir mekanizma ile 6 mm çapındaki polimer pim kola bağlanmıştır. Makine çalıştırıldığında, pim numunesinin diske sürtünmesiyle pim numunesinin bağlı olduğu kol aparatı da diskin dönme yönüne doğru hareket etmek istemektedir. Bu ileriye doğru olan hareket yanal kuvveti vermektedir. Bu yanal kuvvet ise bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Alınan veriler aynı zamanda direk bilgisayarda Excel programında depolanmıştır. Deneylerde dakikada yaklaşık 1000 yanal yük verisi alınmış aynı zamanda deneylerde kullanılan yüke bölünerek Excel programında grafik haline getirilmiştir. Sürtünme katsayısı yanal kuvvetin, normal uygulanan kuvvete oranı olarak ifade edilir ve Eşitlik 5’deki formülle hesaplanır. Formülde, μ ; sürtünme katsayısını, F_s ; yanal sürtünme kuvvetini (N), F_n ise normal kuvveti (N) göstermektedir.



Şekil 1. Standartlara göre hazırlanan test numuneleri ve enjeksiyon kalıbı

Tablo 2. Mika ve kaya yünü mineral elyaf katkılı PA-6 kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Parametreler	Kompozit malzemeler	
	PA-6+ %20Mika	PA6+ %20KYME
Yoğunluk (g/cm ³)	1,26	1,27
Sertlik (Shore D)	77±1	76±1
Çekme mukavemeti (MPa)	69,8±0,45	81,2±0,5
Elastiklik modülü (MPa)	4113±108	3540±88
Gerinim (%)	6,54±0,28	19±0,37
Darbe mukavemeti (kJ/m ²)	8,1±0,3	10,6±0,5



Şekil 3. Uygulanan basınca bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim

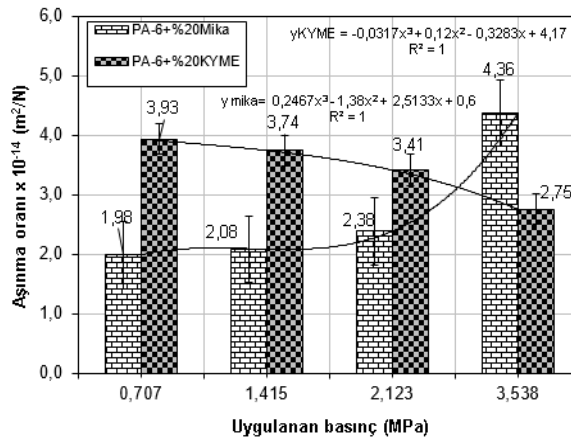
Şekil 3'te % 20 mika ve % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf takviyeli PA-6 esaslı kompozitlerin termoset polyester kompozit disk malzeme yüzeyine karşı 0,5 m/s kayma hızında, uygulanan basınca bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, % 20 mika ve % 20 kaya yünü mineral elyaf takviyeli PA-6 esaslı kompozitlerin polyester esaslı termoset kompozit disk malzeme yüzeyine karşı çalışmaları durumundaki sürtünme katsayıları 0.04 ile 0.067 arasında değişmiştir. Bu değerlerin oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin ise pim ve disk malzemelerin karşılıklı olarak polimer esaslı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum daha önce Unal ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [4] da gözlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, numunelere uygulanan basıncın artmasına bağlı olarak deneylerde kullanılan kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. PA-6+%20Mika kompozit malzemesi için numuneye uygulanan basıncın 0,707 MPa'dan 3,538 MPa'a çıkarılması ile kompozitin sürtünme katsayısının yaklaşık olarak % 62,5 oranında arttığı belirlenmiştir. Şekil 3'de PA-6+%20Mika kompoziti için sürtünme katsayısı ile uygulanan basınç ilişkisini veren formül Eşitlik 6'daki gibidir.

$$\mu_{\text{mika}} = 0,015 + 0,0378P - 0,015P^2 + 0,022P^3 \quad (6)$$

Formülde μ_{mika} mika katkılı kompozitin sürtünme katsayısını, P ise uygulanan basıncı ifade etmektedir. $R^2=1$ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, yine Şekil 3'de PA-6+%20KYME kompoziti için de sürtünme katsayısı ile uygulanan basınç arasındaki ilişki verilmiş olup Eşitlik 7'deki denklem ile $R^2=1$ olarak belirlenmiştir. Formülde μ_{KYME} kaya yünü mineral katkılı kompozitin sürtünme katsayısını, P ise uygulanan basıncı ifade etmektedir.

$$\mu_{KYME}=0,055-0,0123P+0,0085P^2-0,012P^3 \quad (7)$$

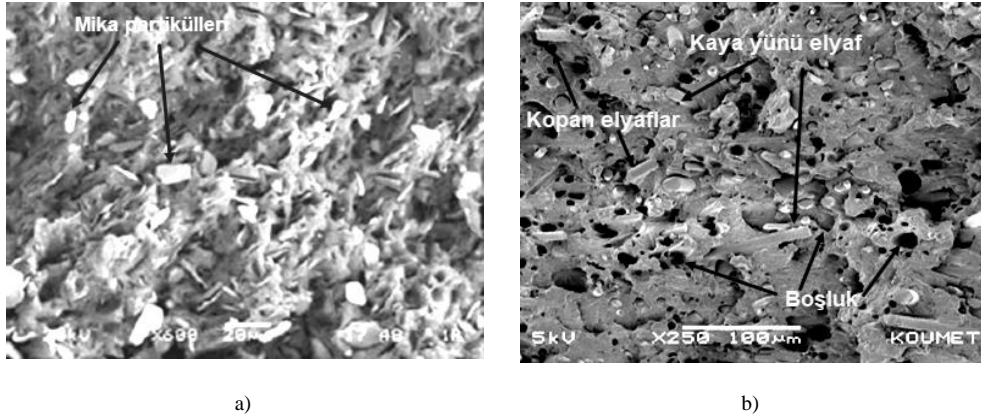
PA-6+%20KYME kompoziti için ise uygulanan basıncın 0,707 MPa'dan 3,538 MPa'a çıkarılması ile kompozit malzemenin sürtünme katsayısında yaklaşık olarak % 34 oranında artış tespit edilmiştir. Sürtünme katsayılarındaki artışın sebebi mika ve kaya yünü takviyeli poliamid-6 kompozitleri ile % 40 kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozit malzemelerin teması neticesidir. Literatürde yapılan triboloji çalışmalarının birisinde [9] düşük deney yükleri kullanıldığında disk ile pim malzeme yüzeylerinin temas noktaları arasındaki gerilimin daha düşük olduğu, bundan dolayı sürtünmenin sebep olduğu ısısının da düşük olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada uygulanan yükün ve kayma hızının artışına bağlı olarak temas eden malzemelerin sürtünme ısısının arttığı ve buna ilave olarak ta aşınma partiküllerinin karşı disk malzeme yüzeyine yapıştığı belirtilmiştir. You ve arkadaşları da [14] malzemeye uygulanan yükün artışına bağlı olarak malzemelerin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Bu artışın, malzemelerin temas noktalarındaki sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık artışından olduğu belirtilmiştir. Buna ilaveten, uygulanan yüksek yükler, sürtünen yüzeylerin sıcaklığının artmasına, numune yüzeylerinin yoğunlaşmasına ve viskoz akışın meydana gelmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, uygulanan yükün artırılması ile polimer kompozit malzeme ve karşı disk malzeme arasında gerçek temas alanının arttığı ve dolayısıyla adhezif yapışma ve karşı diske matris transferinin arttığı belirtilmiştir. Kaya yünü mineral elyafa göre mika katkılı PA-6 kompozitlerinin azalan sürtünme katsayısı, mikanın tabakalı yapıya sahip olması ile ilgili olabilir. Bu tabakalar, birbiri üzerinde kaymaya izin veren zayıf kuvvetler ile birbirine bağlıdır ve bir kesme kuvveti uygulandığında yağlayıcılık özelliği gösterirler. Ayrıca, PA-6 polimerine ilave edilen mika katkısı kompozitin dayanımını artırmıştır. Bu artış daha önce yapılan çalışmalarla [18,21] da benzerlik göstermektedir. PA-6 kompozitinde sert faz olarak görev yapan mika, PA-6 ve karşı disk arasındaki etkileşimi belirgin bir şekilde azaltmanın yanında yük transferini destekleyerek aşınma özelliklerinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Elyaf katkılı kompozitlerin tribolojik özellikleri ise elyaf ve matris arasındaki kuvvetli adhezyona bağlıdır. Ancak, en büyük problem, elyaf ve matris arasında kırılmanın meydana gelmesidir ve bu durum aşınma mekanizmasını, malzemenin mekanik özelliklerine göre kırılmaya daha bağımlı hale getirmektedir [29]. Şekil 5'te PA-6 polimerinden kopan ve kırılan kaya yünü mineral elyaflar görülmektedir. Unal ve arkadaşları [30] kayma süresince temas alanında, polimer matristen daha sert olan kopmuş fiberlerin aşındırıcı malzeme gibi davranıp malzemenin aşınma direnç özelliklerini kötüleştirdiğini belirtmiştir. Kompozitlerin aşınma oranını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi uygulanan yük veya basınçtır. Artan yük veya basınç ile adhezif aşınma mekanizması baskın hale gelmektedir [8].



Şekil 4. Uygulanan basınca bağlı olarak aşınma oranındaki değişim

Şekil 4'te ise uygulanan basınca bağlı olarak PA-6+%20Mika ve PA-6+%20KYME kompozitlerin aşınma oranı değerlerinin değişimi verilmiştir. Genel olarak, PA-6+%20Mika ve PA-6+%20KYME kompozitleri için aşınma oranı değerleri yaklaşık olarak 10⁻¹⁴ m²/N mertebesinde elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı 0,707 MPa basınç altında, 1,98x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile PA-6+%20Mika kompozit numunesinde elde edilirken en yüksek aşınma oranı ise 3,538 MPa basınç altında, 4,36x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile yine aynı kompozit malzemede elde

edilmiştir. Grafik incelendiğinde, uygulanan basınç artışına bağlı olarak PA-6+%20Mika kompozitinin aşınma oranı artarken, PA-6+%20KYME kompozitinin aşınma oranı ise azalmıştır. PA-6+%20Mika kompoziti için basıncın 0,707 MPa'dan 3,538 MPa değerine artırılması ile yani basıncın % 400 oranında artırılması ile kompozitin aşınma oranının yaklaşık olarak % 120 oranında arttığı belirlenmiştir. Yani aşınma direncinin mika katkısı ile arttığı belirlenmiştir. Benzer bir sonuç Gan ve arkadaşları [22] tarafından daha önce yapılan bir çalışmada da elde edilmiştir. PA-6+%20KYME kompoziti için ise basıncın yaklaşık %400 oranında artırılması ile aşınma oranı % 43 oranında azalmıştır. Yani kaya yünü mineral elyaf ilavesi de kompozitin aşınma direncini artırmıştır. Aşınma direncindeki artış, elyafın ilave edilmesi ile kompozitin artan mekanik özelliklerine ve kompozitin deformasyonunun engellenmesine bağlıdır [31]. Jawali ve arkadaşları da [15] yüksek elastiklik modülüne sahip cam elyaf mukavemet artırıcı katkının, poliamid-6 polimerine ilave edilmesi ile aşınma direncinin arttığı aynı zamanda kompozitin ölçü kararlılığının da arttığını belirtmiştir. Kumar ve arkadaşları da [9] polimer malzemesine kuvvetli bir şekilde bağlanan yüzey modifiyeli katkının, polimer matrisinden katkı elemanına yük transferini sağladığı için karşı diskin kuvvetli deformasyonunu engellediğini belirtmişlerdir. Çalışmada kullanılan mika ve kaya yünü mineral elyaf katkıların kompozit malzemelerin aşınma oranına etkisi incelendiğinde ise 3,58 MPa basınca kadar mika katkılı PA-6 polimer kompozitin aşınma oranının, kaya yünü mineral elyaf takviyeli kompozitin aşınma oranına göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. 1,145 MPa basınç altındaki çalışma şartlarında, aşınma oranındaki fark yaklaşık olarak % 45 oranında elde edilmiştir. Rijit partikül ve deforme olabilen polimer içeren polimer kompozit sistemlerinde her iki bileşende sürtünme süresince etkileşim halindedir. Belirli bir sitemde, sürtünme katsayısı ve aşınma oranının malzemenin artan elastiklik modülü ile azalan gerçek temas alanı ile ilişkili olduğu bilinmektedir [32]. Diğer bir ifade ile polimer kompozitlerin yüksek elastiklik modülüne sahip olması sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azalmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden, çekme deneyi sonucunda da görüldüğü gibi yüksek elastiklik modülüne sahip mika katkılı PA-6 kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı daha düşük elde edilmiştir. Benzer bir açıklama, Gan ve arkadaşları [22] tarafından yapılan mika katkılı poli-akril-eter-keton (PAEK) kompozitleri için yapılmış ve çalışma sonucunda aşınma ve sürtünmenin gerçekleştiği endüstriyel uygulamalarda mika katkılı polimer esaslı kompozitlerin kullanılabilirliği belirtilmiştir.



Şekil 5. Deneylerde kullanılan kompozit malzemelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) kırık yüzey görüntüleri a) Mika takviyeli PA-6 kompozit b) Kaya yünü elyaf takviyeli PA-6 kompozit

Şekil 5'te çekme testi sonrası kompozitlerin kırık yüzeylerinden alınmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Şekil 5-a'da görüldüğü gibi yüzey modifikasyonlu mika katkısının kaya yünü mineral elyafli kompozite göre PA-6 polimer ana matrisi ile iyi bir bağ yaptığı gözlenmiştir. PA-6 polimer ana matrisi ile mika arasındaki arayüzey etkileşimi nedeniyle oluşan kuvvetli bağlanma kompozit malzemenin gerek sürtünme katsayısı gerekse aşınma oranının gelişmesine katkı sağlamıştır. Şekil 5-b'de ise kaya yünü mineral elyaf katkılı PA-6 kompozitine ait kopma yüzeyi taramalı elektron mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Kaya yünü mineral elyafın farklı yönlerde olacak şekilde matris bünyesinde dağıldığı görülmektedir. Bununla birlikte,

matristen elyafların sıyrıldığı ve kırıldığı da gözlenmiştir. Bunun sebebinin ise kaya yünü mineral elyafın yüzey modifikasyonunun olmayışdır. Bu durum, kompozitin tribolojik özelliklerinin kötüleşmesine de sebep olmuştur.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada ağırlık olarak % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf ve mika takviyeli poliamid 6 (PA-6) polimer kompozitlerinin termoset polyester kompozit disk yüzeyine karşı kuru kayma çalışma ortamındaki aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Artan uygulama basıncına bağlı olarak sürtünme katsayısı artmıştır.
2. Mika katkısının sürtünme katsayısını kaya yünü mineral elyafa göre daha fazla düşürdüğü belirlenmiştir.
3. Artan basınca bağlı olarak PA-6+%20Mika kompoziti için aşınma oranı artarken, PA-6+%20KYME kompoziti için aşınma oranı azalmıştır.
4. En düşük aşınma oranı 0,7MPa basınç altında, 1.98×10^{-14} m²/Nm değeri ile PA-6+%20Mika kompozit numunesinde elde edilmiştir.
5. Gerçekleştirilen deney şartlarında elde edilen veriler ışığında uygulanan basıncın düşük olması (2,123 MPa' a kadar), mika katkılı poliamid-6 kompozit malzemesi, kaya yünü katkılı poliamid-6 kompozit malzemesine göre yaklaşık olarak % 42 oranında daha az aşındığı tespit edilmiştir.
6. Sonuç olarak, % 20 KYME katkılı PA-6 kompozitine göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olan, ortalama sürtünme katsayısı 0.05 ve ortalama aşınma oranı 2.7×10^{-14} m²/Nm olan % 20 Mika katkılı PA-6 kompoziti, elektriksel uygulamalarda % 40 kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozit malzemesi ile elektrik kontak kesicilerde kullanılacak en uygun malzeme çifti olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Ana, H., Susana, L., Davim, J. P. (2018). Influence of sliding velocity on the tribological behaviour of PA66GF30 and PA66 + MoS₂: an analysis of morphology of sliding surface by digital image processing. *Polymer Bulletin*, 75, 5113-5131.
- [2] Pooria, K., Akbar, S. (2017). Improvement of dry sliding tribological properties of polyamide 6 using diamond nanoparticles. *Tribology International*, 115, 370-377.
- [3] Raja, V. L., Kumaravel, A. (2014). Comparative Study on the Wear Properties of Fly Ash and Silica Fume Filled Nylon Composites. *Applied Mechanics and Materials*, 592-594, 1277-1284.
- [4] Unal, H., Saylan, T., Mimaroglu, A. (2014). Thermal, mechanical and tribological performance of polymer composites rubbed against polymer composites in application in electrical contact breakers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 228(6), 608-615.
- [5] Suryasarathi, B., Mahanwar, P. A. (2004). Effect of Particle Size of Filler on Properties of Nylon-6. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 3(1), 23-31.
- [6] Kumar, S. S., Kanagaraj, G. (2016). Investigation on mechanical performances of PA-6 and Al₂O₃ reinforced PA-6 polymer composites. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, VII(I), 69-74.
- [7] Kulkarni, M. V., Elangovan, K., HemachandraReddy, K., Poojari, M., Harsha, S. (2015). Tribological Behaviours of CaSiO₃ Reinforced PA6 Polymer–Metal Sliding Combinations under Dry Friction Conditions. *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, 5(1), 18-23.

- [8] Kumar, S. S., Kanagaraj, G. (2016). Investigation of Characterization and Mechanical Performances of Al₂O₃ and SiC Reinforced PA-6 Hybrid Composites. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 26, 788-798.
- [9] Kumar, S. S., Kanagaraj, G. (2016). Investigation on Mechanical and Tribological Behaviours of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4347-4357.
- [10] Kim, J., Jang, H., Kim, J. (2014). Friction and wear of monolithic and glass-fiber reinforced PA66 in humid conditions. *Wear*, 309, 82-88.
- [11] Shelke, S. D., Pawar, D. S. (2017). Tribological Behaviour of Polyamide 66 Blend with CF & PTFE. *International Journal for Scientific Research & Development*, 5(5), 237-242.
- [12] Orhan, S. A., Shaker, S. H., Ahmed, N. Al-K. (2020). Investigation of Wear Behaviour for Novel Polyamide 66 Composites under Dry Sliding Conditions. *International Journal of Nano-electronics and Materials*, 13(1), 9-18.
- [13] Ayesha, A., Islam, M. A. (2015). Wear Behaviours of Micron Size Graphite Particle Reinforced Nylon Composite. International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2015 (ICMIME2015), 11-13 December, 2015, RUET, Rajshahi, Bangladesh, 1-6.
- [14] Yi-Lan, Y., Du-Xin, L., Gao-Jie, S., Ruo-Yun, L., Xin, D. (2016). Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(4), 494-507.
- [15] Jawali, N. D., Siddeswarappa, B., Siddaramaiah. (2006). Physico-mechanical Properties, Machinability, and Morphological Behaviour of Short Glass Fiber-reinforced Nylon 6 Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(13), 1409-1418.
- [16] Nuruzzaman, D. M., Asif Iqbal, A. K. M., Oumer, A. N., Ismail, N. M., Basri, S. (2016). Experimental investigation on the mechanical properties of glass fiber reinforced nylon. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 114, 1-7.
- [17] Yi-Lan, Y., Du-Xin, L., Gao-Jie, S., Ruo-Yun, L., Xin, D. (2016). Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(4), 494-507.
- [18] Unal, H., Mimaroglu, A. (2014). Evaluation of morphological characteristics and mechanical performance of Rock-force mineral fiber- and glass fiber-reinforced polyamide-6 composites. *Science and Engineering of Composite Materials*, 21(3), 323-328.
- [19] Fahmi, A., Jawaid, M., Hassan, A., Wahit, M. U. (2013). Mechanical Properties of Mica-Filled Polycarbonate/Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) Composites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52, 727-736.
- [20] Lubomir, L., David, M., Barbora, L., Martin, V., Michal, S., Klara, C., Jakub, V., Kristian, E. W., Richard, W. G., Neil, A. R. (2018). Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behaviour of high density poly (ethylene)/mica and poly (ethylene)/wollastonite composites. *Composites Part B*, 141, 92-99.
- [21] Unal, H., Mimaroglu, A. (2012). Mechanical and Morphological Properties of Mica and Short Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composites. *International Journal of Polymeric Materials*, 61, 834-846.

- [22] Gan, D., Lu, S., Caisheng, S., Zhijian, W. (2001). Mechanical properties and frictional behaviour of a mica-filled poly (aryl ether ketone) composites. *European Polymer Journal*, 37, 1359-1365.
- [23] Aljaž, P., Alja, K., Mitjan, K. (2017). Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*, 378–379, 17-26.
- [24] Said, D., S. Larbi, Ali, B. (2016). Study of the Tribological Behaviour of a Pin on Disc Type of Contact. World Academy of Science, Engineering and Technology International *Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 10(7), 1626-1231.
- [25] Krol, A., Gocman, K. (2017). The Comparative Study of Polymers For Sliding Pairs With UNMT (Universal Nano/Micro Tester). *Tribologia-Finnish Journal of Tribology*, 1-2, 35, 31-39.
- [26] Abdessalem, K., Khaled, E. (2017). Tribological Behaviour of Wheel-Rail Contact under Different Contaminants Using Pin-On-Disk Methodology. *Journal of Tribology*, 139(1), 1-9.
- [27] Demir, Z. (2013). Tribological performance of polymer composites used in electrical engineering applications. *Bulletin of Materials Science*, 36(2), 341-344.
- [28] He, D., Jiang, B. (1993). The elastic modulus of filled composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 49(4), 617-621.
- [29] Kukureka, S.N., Hooke, C.J., Rao, M., Liao, P., Chen, Y.K. (1999). Effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact. *Tribology International*, 32, 107–116.
- [30] Unal, H., Sen, U., Mimaroglu, A. (2005). Abrasive wear behaviour of polymeric materials. *Materials & Design*, 26, 705–710.
- [31] Li, D. X., Xie, Y., Li, W. J. (2013). Tribological and mechanical behaviors of polyamide 6/glass fiber composite filled with various solid lubricants. *The Scientific World Journal*, 2013(5), 1-9.
- [32] Bowden, F.P., Tabor, D.T. (1964). Friction and lubrication of solid: Part 2. *Oxford: Clarendon Pres*, 1.

Araştırma Makalesi - Research Article

Düzenli Uzun Dalga Denkleminin Hiperbolik Tip Yürüyen Dalga Çözümleri

Hülya Durur^{1*}, Asıf Yokuş², Doğan Kaya³

Geliş / Received: 04/03/2020

Revize / Revised: 25/06/2020

Kabul / Accepted: 30/06/2020

ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı $(1/G')$ -açılım yöntemi kullanılarak Düzenli Uzun Dalga (RLW) denklemi için yürüyen dalga çözümlerini elde etmektir. Elde edilen çözümlerde sabitlere özel değerler verilerek 3 boyutlu, 2 boyutlu ve kontur grafikleri sunulmuştur. Bu grafikler Düzenli Uzun Dalga denkleminin özel bir çözümüdür ve denklemin durağan bir dalgasını temsil etmektedir. Bu makalede sunulan çözümleri ve grafikleri bulmak için bilgisayar paket programı kullanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler- $(1/G')$ -Açılım Yöntemi, Düzenli Uzun Dalga Denklemi, Yürüyen Dalga Çözümü, Tam Çözüm.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: hulyadurur@ardahan.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-9297-6873>
Ardahan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ardahan, 75000, Türkiye.

²İletişim: asfyokus@yahoo.com, <http://orcid.org/0000-0002-1460-8573>
Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Aktüerya Bölümü, Elazığ, 23100, Turkey.

³İletişim: dkaya36@yahoo.com, <http://orcid.org/0000-0003-4773-1313>
İstanbul Ticaret Üniversitesi, Matematik Bölümü, Üsküdar, İstanbul, Turkey.

Hyperbolic Type Traveling Wave Solutions of Regularized Long Wave Equation

ABSTRACT

The main goal of this study is to obtain the traveling wave solutions for Regularized Long Wave (RLW) equation by using $(1/G')$ -expansion method. By giving special values to the constants in the solutions obtained, 3D, 2D, and contour graphics are presented. These graphics are a special solution of the (RLW) equation, and they represent a stationary wave of the equation. A computer package program is used to find the solutions and graphics presented in this article.

Keywords- $(1/G')$ -Expansion Method, Regularized Long Wave Equation, Traveling Wave Solution, Exact Solution.

I. INTRODUCTION

Traveling wave solutions of nonlinear evolution equations (NLEEs) play an active role in applied mathematics and mathematical physics. Variety methods have been used to find the analytical solutions of such equations (NLDEs). Some of these are F-expansion technique [1], Laplace transform method [2], $(1/G')$ -expansion method [3-5], the residual power series method [6,7], modified exp -expansion function method [8-10], (G'/G) -expansion method [11,12], Adomian's decomposition method [13], collocation method [14,15], sub equation method [16,17], Homotopy perturbation method [18], new sub equation method [19] and so on [28-35].

In this study, authors investigated the analytical solutions of the (RLW) equation. Consider the form of the (RLW) equation [20],

$$u_t + u_x + a(u^2)_x - bu_{xxt} = 0, \quad a, b \in R, \quad (1)$$

the function u searched here depends on the variables x and t .

There are many studies in the literature on RLW equation. Some of the studies are as follows: Solitary wave solutions of the generalized RLW equation are obtained [21], solutions of generalized RLW equation are obtained using variational iteration method [22], solutions of the one-dimensional (RLW) equation are obtained using a lumped Galerkin method based on quadratic B-spline finite elements numerical [23], approximate numerical solution for the nonlinear (RLW) equation are obtained applying adomian decomposition method [24], numerical solution of the one-dimensional (RLW) equation is obtained using linearized implicit finite difference method [25], the solution of the (RLW) equation is presented [26], and solitary wave solutions of the two-dimensional RLW equation are obtained [27].

II. MATERIAL AND METHOD

A. $(1/G')$ -Expansion Method

We get general form of NLPDEs

$$\sigma \left(u, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \dots \right) = 0. \quad (2)$$

Here, let $u = u(x, t) = u(\xi)$, $\xi = kx + wt$, where k, w are constants. We can be converted into the following nonlinear ODE for $u(\xi)$:

$$F(u, u', u'', u''', \dots) = 0. \quad (3)$$

The solution of Eq. (3) is assumed to have the form

$$u(\xi) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \left(\frac{1}{G'} \right)^i, \quad (4)$$

where a_i , $(i = 0, 1, \dots, n)$ are constants, n is a fixed number to be calculated by the principle of homogeneous balance according to the properties of each equation and $G = G(\xi)$ provides the following second-order IODE

$$G'' + \lambda G' + \mu = 0, \quad (5)$$

where λ and μ are constants to be determined after,

$$\frac{1}{G'(\xi)} = \frac{1}{-\frac{\mu}{\lambda} + A \cosh[\xi\lambda] - A \sinh[\xi\lambda]}, \quad (6)$$

where A is integral constant. If the desired derivatives of the Eq. (4) are calculated and substituting in the Eq. (3), a polynomial with the argument $(1/G')$ is attained. An algebraic equation system is created by equalizing the coefficients of this polynomial to zero. The equation is solved using a package program and put into place in the default Eq. (3) solution function. Finally, the solutions of Eq. (1) are found.

III. SOLUTIONS OF THE RLW EQUATION

The traveling wave transmutation $\xi = kx + wt$, allows us to convert Eq. (1) into an ODE for $u = u(\xi)$,

$$(k + w)u' + 2akuu' - bk^2wu''' = 0, \quad (7)$$

integrating Eq. (7) once with respect to ξ and by setting the integration constant to zero, we attain

$$(w + k)u + aku^2 - bk^2wu'' = 0. \quad (8)$$

In Eq. (8), we achieve balancing term $n = 2$ and in Eq. (4), the following situation is obtained:

$$u(\xi) = a_0 + a_1 \left(\frac{1}{G'} \right) + a_2 \left(\frac{1}{G'} \right)^2, \quad a_2 \neq 0, \quad (9)$$

where a_1 and a_2 cannot be zero at the same time. Replacing Eq. (9) into Eq. (8) and the coefficients of the algebraic Eq. (1) are equal to zero, can attain the following algebraic equation systems

$$\text{Const} : ka_0 + wa_0 + aka_0^2 = 0,$$

$$\left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^1 : ka_1 + wa_1 - bk^2w\lambda^2 a_1 + 2aka_0 a_1 = 0,$$

$$\left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^2 : -3bk^2w\lambda\mu a_1 + aka_1^2 + ka_2 + wa_2 - 4bk^2w\lambda^2 a_2 + 2aka_0 a_2 = 0, \quad (10)$$

$$\left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^3 : -2bk^2w\mu^2 a_1 - 10bk^2w\lambda\mu a_2 + 2aka_1 a_2 = 0,$$

$$\left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^4 : -6bk^2w\mu^2 a_2 + aka_2^2 = 0.$$

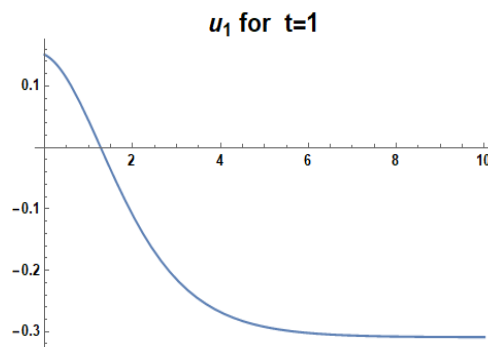
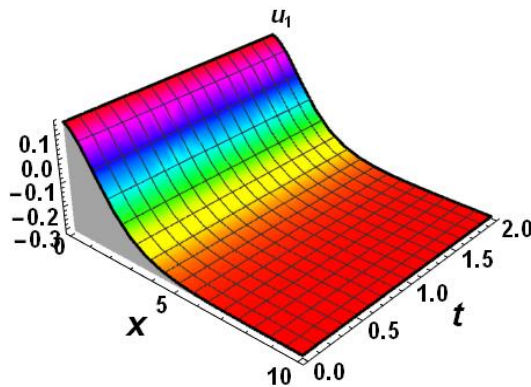
When the resulting system Eq. (10) is solved by a package program or manually, we can present the following situations.

Case1.

$$a_0 = -\frac{bk^2\lambda^2}{a(1+bk^2\lambda^2)}, a_1 = -\frac{6bk^2\lambda\mu}{a(1+bk^2\lambda^2)}, a_2 = -\frac{6bk^2\mu^2}{a(1+bk^2\lambda^2)}, w = -\frac{k}{1+bk^2\lambda^2}, \quad (11)$$

replacing values Eq. (11) into Eq. (9) and we have the following hyperbolic type solution for Eq. (1)

$$u_1(x,t) = -\frac{bk^2\lambda^2}{a(1+bk^2\lambda^2)} - \frac{6bk^2\mu^2}{a(1+bk^2\lambda^2)\left(-\frac{\mu}{\lambda} + A \cosh\left[\lambda\left(kx - \frac{kt}{1+bk^2\lambda^2}\right)\right] - A \sinh\left[\lambda\left(kx - \frac{kt}{1+bk^2\lambda^2}\right)\right]\right)^2} - \frac{6bk^2\lambda\mu}{a(1+bk^2\lambda^2)\left(-\frac{\mu}{\lambda} + A \cosh\left[\lambda\left(kx - \frac{kt}{1+bk^2\lambda^2}\right)\right] - A \sinh\left[\lambda\left(kx - \frac{kt}{1+bk^2\lambda^2}\right)\right]\right)}. \quad (12)$$



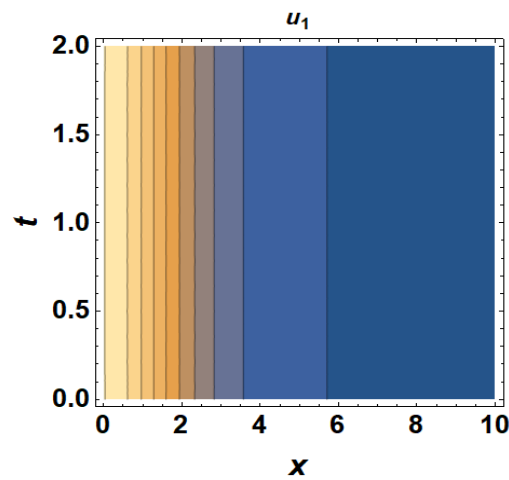


Figure 1. Respectively 3D, 2D, and contour graphics for $A = -2, b = 2, k = 3, \mu = 1, \lambda = 0.3, a = 2, t = 1$ values of Eq.(12).

Case2.

$$a_0 = 0, a_1 = \frac{6\sqrt{b}\sqrt{w}\sqrt{k+w}\mu}{a}, a_2 = \frac{6bkw\mu^2}{a}, \lambda = \frac{\sqrt{k+w}}{\sqrt{bk}\sqrt{w}}, \quad (13)$$

replacing values Eq. (13) into Eq. (9) and we have the following hyperbolic type solution for Eq. (1):

$$u_2(x,t) = \frac{6bkw\mu^2}{a \left(-\frac{\sqrt{bk}\sqrt{w}\mu}{\sqrt{k+w}} + A \cosh \left[\frac{\sqrt{k+w}(tw+kx)}{\sqrt{bk}\sqrt{w}} \right] - A \sinh \left[\frac{\sqrt{k+w}(tw+kx)}{\sqrt{bk}\sqrt{w}} \right] \right)^2} + \frac{6\sqrt{b}\sqrt{w}\sqrt{k+w}\mu}{a \left(-\frac{\sqrt{bk}\sqrt{w}\mu}{\sqrt{k+w}} + A \cosh \left[\frac{\sqrt{k+w}(tw+kx)}{\sqrt{bk}\sqrt{w}} \right] - A \sinh \left[\frac{\sqrt{k+w}(tw+kx)}{\sqrt{bk}\sqrt{w}} \right] \right)}. \quad (14)$$

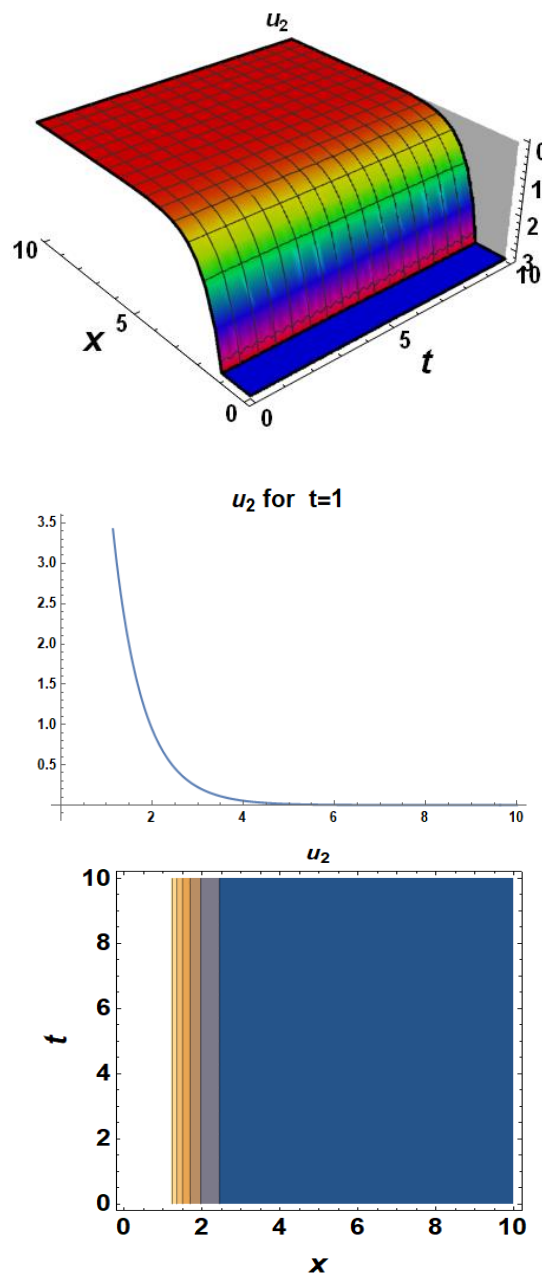


Figure 2. Respectively 3D, 2D, and contour graphics for $A = 3, b = 1, k = 2, \mu = 2, a = 0.2, w = 2, t = 1$ values of Eq.(14).

IV. CONCLUSIONS

In this paper, we obtain analytical solutions of RLW equation using $(1/G')$ -expansion method. 3D, 2D, and contour graphics are presented by giving special values to the constants in the obtained solutions. Each method offers solutions to nonlinear partial differential equations with different properties. It produces a hyperbolic solution function in the $(1/G')$ -expansion method. Solutions of this type have an important place especially in studies with shock wave structure and asymptotic behavior. This article shows that this method is efficient and practically suitable for applications in attaining analytical solutions for the RLW equation. With the aid of

computer package program, we guarantee the correctness of the solutions found by returning them to the original equation. We hope it will be useful for other studies in applied sciences.

REFERENCES

- [1] Silambarasan, R., Baskonus, H. M., & Bulut, H. (2019). Jacobi elliptic function solutions of the double dispersive equation in the Murnaghan's rod. *The European Physical Journal Plus*, 134(3), 125.
- [2] Faraj, B., & Modanli, M. (2017). Using difference scheme method for the numerical solution of telegraph partial differential equation. *Journal of Garmian University*, 3, 157-163.
- [3] Yokus, A., & Yavuz, M. (2018). Novel comparison of numerical and analytical methods for fractional Burger–Fisher equation. *Discrete & Continuous Dynamical Systems-S*, 0.
- [4] Yokuş, A., & Durur, H. (2019). Complex hyperbolic traveling wave solutions of Kuramoto–Sivashinsky equation using $(1/G')$ expansion method for nonlinear dynamic theory. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 590-599.
- [5] Durur H., & Yokuş, A. $(1/G')$ -Açılım Metodu Kullanarak Sawada–Kotera Denklemi Hiperbolik Yürüyen Dalga Çözümleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2019; 19(3): 615-619.
- [6] Durur, H., Şenol, M., Kurt, A., & Taşbozan, O. Zaman-Kesirli Kadomtsev–Petviashvili Denklemi Conformable Türev ile Yaklaşık Çözümleri. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 796-806.
- [7] Prakasha, D. G., Veerasha, P., & Baskonus, H. M. (2019). Residual power series method for fractional Swift–Hohenberg equation. *Fractal and Fractional*, 3(1), 9.
- [8] Baskonus, H. M., Bulut, H., & Atangana, A. (2016). On the complex and hyperbolic structures of the longitudinal wave equation in a magneto-electro-elastic circular rod. *Smart Materials and Structures*, 25(3), 035022.
- [9] Sulaiman, T. A., Bulut, H., Yokus, A., & Baskonus, H. M. (2019). On the exact and numerical solutions to the coupled Boussinesq equation arising in ocean engineering. *Indian Journal of Physics*, 93(5), 647-656.
- [10] Yokus, A., Baskonus, H. M., Sulaiman, T. A., & Bulut, H. (2018). Numerical simulation and solutions of the two- component second order KdV evolutionary system. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 34(1), 211-227.
- [11] Durur, H. (2019). Different types analytic solutions of the $(1+ 1)$ -dimensional resonant nonlinear Schrödinger's equation using (G'/G) -expansion method. *Modern Physics Letters B*, 2050036.
- [12] Khan, H., Barak, S., Kumam, P., & Arif, M. (2019). Analytical Solutions of Fractional Klein-Gordon and Gas Dynamics Equations, via the (G'/G) -Expansion Method. *Symmetry*, 11(4), 566.
- [13] Kaya, D., & Yokus, A. (2005). A decomposition method for finding solitary and periodic solutions for a coupled higher-dimensional Burgers equations. *Applied Mathematics and Computation*, 164(3), 857-864.
- [14] Aziz, I., & Şarler, B. (2010). The numerical solution of second-order boundary-value problems by collocation method with the Haar wavelets. *Mathematical and Computer Modelling*, 52(9-10), 1577-1590.
- [15] Aziz, I., & Asif, M. (2017). Haar wavelet collocation method for three-dimensional elliptic partial differential equations. *Computers & Mathematics with Applications*, 73(9), 2023-2034.
- [16] Durur, H., Kurt, A., & Tasbozan, O. (2020). New Travelling Wave Solutions for KdV6 Equation Using Sub Equation Method. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 5(1), 455-460.

- [17] Durur, H., Taşbozan, O., Kurt, A., & Şenol, M. New Wave Solutions of Time Fractional Kadomtsev-Petviashvili Equation Arising In the Evolution of Nonlinear Long Waves of Small Amplitude. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 807-815.
- [18] Yavuz, M., & Ozdemir, N. (2018). Numerical inverse Laplace homotopy technique for fractional heat equations. *Thermal Science*, 22(Suppl. 1), 185-194.
- [19] Kurt, A., Tasbozan, O., and Durur, H., The Exact Solutions of Conformable Fractional Partial Differential Equations Using New Sub Equation Method. *Fundamental Journal of Mathematics and Applications*, 2(2), 173-179, (2019).
- [20] Kabir, M. M., Borhanifar, A., & Abazari, R. (2011). Application of (G' G)-expansion method to Regularized Long Wave (RLW) equation. *Computers & Mathematics with Applications*, 61(8), 2044-2047.
- [21] Kaya, D. (2004). A numerical simulation of solitary-wave solutions of the generalized regularized long-wave equation. *Applied Mathematics and Computation*, 149(3), 833-841.
- [22] Soliman, A. A. (2005). Numerical simulation of the generalized regularized long wave equation by He's variational iteration method. *Mathematics and Computers in Simulation*, 70(2), 119-124.
- [23] Esen, A., & Kutluay, S. (2006). Application of a lumped Galerkin method to the regularized long wave equation. *Applied Mathematics and Computation*, 174(2), 833-845.
- [24] El-Danaf, T. S., Ramadan, M. A., & Alaal, F. E. A. (2005). The use of adomian decomposition method for solving the regularized long-wave equation. *Chaos, Solitons & Fractals*, 26(3), 747-757.
- [25] Kutluay, S., & Esen, A. (2006). A finite difference solution of the regularized long-wave equation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2006.
- [26] Dağ, İ. (2000). Least-squares quadratic B-spline finite element method for the regularised long wave equation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 182(1-2), 205-215.
- [27] Dehghan, M., & Salehi, R. (2011). The solitary wave solution of the two-dimensional regularized long-wave equation in fluids and plasmas. *Computer Physics Communications*, 182(12), 2540-2549.
- [28] Ahmad, H., Khan, T. A., Durur, H., Ismail, G. M., & Yokus, A. (2020). Analytic approximate solutions of diffusion equations arising in oil pollution. *Journal of Ocean Engineering and Science*.
- [29] Yokus, A. (2020). On the exact and numerical solutions to the FitzHugh–Nagumo equation. *International Journal of Modern Physics B*, 2050149.
- [30] Yokus, A., Durur, H., Ahmad, H., & Yao, S. W. (2020). Construction of Different Types Analytic Solutions for the Zhiber-Shabat Equation. *Mathematics*, 8(6), 908.
- [31] Yokus, A., Durur, H., & Ahmad, H. (2020). Hyperbolic type solutions for the couple Boiti-Leon-Pempinelli system. *Facta Universitatis, Series: Mathematics and Informatics*, 35(2), 523-531.
- [32] Durur, H., & Yokuş, A. (2020). Analytical solutions of Kolmogorov–Petrovskii–Piskunov equation. *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 628-636.
- [33] Yokus, A., Kuzu, B., & Demiroğlu, U. (2019). Investigation of solitary wave solutions for the (3+ 1)-dimensional Zakharov–Kuznetsov equation. *International Journal of Modern Physics B*, 33(29), 1950350.

- [34] Modanlı, M. (2019). On the numerical solution for third order fractional partial differential equation by difference scheme method. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 9(3), 1-5.
- [35] Yavuz, M. (2017). Novel solution methods for initial boundary value problems of fractional order with conformable differentiation. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 8(1), 1-7.

Araştırma Makalesi - Research Article

WEKA Veri Madenciliği Yazılımının Sürümleri Arasındaki Kalite Değişimlerinin QMOOD ile İncelenmesi

Hakan Gündüz^{1*}

Geliş / Received: 19/03/2020

Revize / Revised: 01/07/2020

Kabul / Accepted: 05/07/2020

ÖZ

QMOOD (Quality Model for Object Oriented Design), dört katmandan oluşan ve bu katmanlar arasındaki ilişkileri değerlendiren hiyerarşik yapıya sahip bir tasarım kalite modelidir. Bu model nesneye dayalı yazılım metriklerini kullanarak yazılım kalite niteliklerinin değerlerini hesaplar. Bu çalışmada, QMOOD kullanılarak, açık kaynak kodlu WEKA veri madenciliği yazılımı sürümlerinin kalite değişimleri gözlenmiştir. Yazılıma yeni sürümlerde farklı özelliklerin eklenmesi ve yazılım tasarım yapısının değişmesi QMOOD'un işlevsellik, esneklik ve yeniden kullanılabilirlik gibi niteliklerini doğrudan etkilerken, sürümlerin kalıtım hiyerarşisi değişikliği ise genişletilebilirlik ve etkinlik niteliklerinin puanlarında oynaklığa sebep olmuştur. Anlaşılabilirlik niteliğinin değerini ise yeni sürümlerde artan metod ve sınıf sayısı olumsuz yönde etkilemiştir. Çalışmanın sonucunda QMOOD ile elde edilen kalite puanlarıyla WEKA sürümlerindeki yapısal değişimlerin paralel olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Yazılım Tasarım Kalitesi, QMOOD, WEKA*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: h.gunduz@bandirma.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2152-5490>)
Yazılım Mühendisliği Bölümü, Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Bandırma, Balıkesir, Türkiye

Investigation of Quality Changes between Versions of WEKA Data Mining Software Using QMOOD

ABSTRACT

QMOOD (Quality Model for Object Oriented Design) is a hierarchical design quality model consisting of four layers and evaluates the relationships between these layers. This model calculates the values of software quality attributes using object-oriented software metrics. In this study, quality changes of open source WEKA data mining software versions were observed using QMOOD. While adding new features to the software and changing the software design structure directly affected the attributes of QMOOD, such as functionality, flexibility, and reusability, the hierarchy change of the versions caused volatility in the scores of extensibility and effectiveness. On the other hand, the increasing number of methods and classes in new versions negatively affected the value of understandability. As a result of the study, it was observed that the structural changes in the WEKA versions were parallel with the quality scores obtained with QMOOD.

Keywords- *Software Design Quality, QMOOD, WEKA*

I. GİRİŞ

Yazılım tasarımı, yazılım geliştirme sürecinin yaratıcı ve en anlamlı safhasıdır ve yazılım kalitesinin geliştirilmesi ve kontrolünde önemli rol oynar. Yazılım tasarımının kalitesi doğrudan yazılım ürününü kalitesini etkilemektedir. Yazılım kalitesi, yazılımla ilgili paydaşların gereksinimlerinin ne kadar karşılandığının ölçüsüdür. Yazılım kalitesinin ölçülüp değerlendirilmesinden önce kalite modelinin oluşturulması gerekir. Yazılım dünyasında kullanılan kalite modelleri, yazılım kalitesini etkileyen kalite bileşenlerini (niteliklerini) ve aralarındaki ilişkileri tanımlamaktadır. Kalite modelinde yazılımın kalitesi karakteristikler ve varsa alt karakteristikler ile belirlenmektedir. Yazılım kalitesinin ölçülmesinde yazılımın nicelik ile ifade edilebilen basit özellikleri kullanılmaktadır. Kalite modelleri aynı zamanda sektördeki yazılımcılar arasında ortak bir dil oluşturmaktadır.

Bu çalışmada Weka veri madenciliği yazılımının sürümleri arasındaki kalite değişimleri incelenmiştir. Weka, Java programlama dilinde yazılmış olup nesneye dayalı tasarıma sahiptir [1]. Weka yazılımının sürümlerinin kalitesinin belirlemede QMOOD modeline benzer şekilde katmanlı bir yapı oluşturulmuştur [2]. Oluşturulan modelde QMOOD modelinde yer alan tasarım kalitesi nitelikleri seçilmiştir. Model de kullanılan nesneye dayalı metrikler ise iPlasma aracıyla çıkarılmış ve nesneye dayalı tasarım özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır [3]. Nesneye dayalı tasarım özellikleri ile tasarım kalitesi arasındaki ilişkilere bakılarak her bir sürümün kalitesi belirlenmiş ve sürümler arası kalite değişimleri bulunmuştur.

II. GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Yazılım kalitesini ölçmek ve değerlendirmek için ilk olarak bir kalite modeli oluşturularak ölçülmek istenenler ve kaliteyi oluşturan bileşenler net bir şekilde tanımlanır. İkinci adımda ölçme yöntemine karar verilir buna uygun olarak veri toplanır. Son adım da ise toplanan veriler (metrikler) ile kalite arasındaki ilişkiler tanımlanır ve yapılan ölçme değerlendirilir.

Literatürde yazılım kalitesini değerlendirmek için oluşturulan modellerin [4-7] yanı sıra nesne yönelimli programlamanın önem kazanmasıyla birlikte nesne yönelimli tasarım kalitesini değerlendirmek amacıyla hiyerarşik modeller de tanımlanmıştır [2]. 1977 yılında McCall tarafından oluşturulan yazılım modeli pek çok yazılımın temeli olarak kabul edilir [8]. Oluşturulan model kullanıcılar ile geliştiriciler arasındaki iletişimi sağlamayı amaçlar. 1992 yılında Victor Basili tarafından oluşturulan “Goal/Question/Metric-GQM” yaklaşımı ise (Hedef/Soru/Metrik) ilk olarak projelerde ortaya çıkan hataları değerlendirilmek için oluşturulmuş fakat daha sonra kalite iyileştirme kavramına uygun hale getirilmiştir [9, 10]. 1991 yılında ISO/IEC yazılım kalitesi tanımlarının standartlaştırılması amacıyla 4 bölümlük bir doküman oluşturmuştur [11, 12].

Nesneye dayalı yazılım tasarımı kalitesinin ölçülmesi için birçok nesneye dayalı metrik seti de geliştirilmiştir. Chidamber ve Kemerer, nesne tabanlı tasarımlar için küçük metrik seti geliştirmiştir. Bu metrik seti 6 metrik içermektedir [13]. Diğer geliştirilen metrik setleri Lorenz ve Kidd Metrikleri [14], Li ve Henry Metrikleri [15], Henderson-Sellers [16]’dir.

Birçok çalışmada MOOD ve QMOOD metrikleri kullanılmıştır [17]. MOOD metrikleri ise yapıyla ilgili basit özellikler içermektedir. Bunlar encapsulation (kapsülleme) (Method Hiding Factor (MHF) ve Attribute Hiding Factor (AHF)), inheritance (kalıtım) (Method Inheritance Factor (MIF) ve Attribute Inheritance Factor (AIF)), polymorphism (çokşekillilik) (Polymorphism Factor (PF)), message passing (Coupling Factor (CF))’dir [18].

Bansiya ve Davis, Quality Model for Object Oriented Design (Nesne Tabanlı Tasarım için Kalite Modeli) (QMOOD) metriklerini tanımlamıştır. QMOOD, yeniden kullanılabilirlik (reusability), işlevsellik (functionality), etkinlik (effectiveness), anlaşılabilirlik (understandability), genişletilebilirlik (extendibility), esneklik (flexibility) gibi tasarım kalite niteliklerini değerlendirebilen güçlü bir modeldir. Nitelikler için kalite değerlendirilmesi temel alınarak yazılım sisteminin toplam kalite indeksi (Total Quality Index (TQI)) hesaplanmaktadır [2]. QMOOD kullanılarak yazılım tasarım kalitesi ölçülürken metriklerin değer aralıkları farklı olduğundan, z-puanı normalizasyonu kullanılmaktadır [19].

Birden fazla metrik setinin kullanıldığı çalışmalarda bulunmaktadır [20]. Chidamber-Kemerer (CK) ve Lorenze-Kidd (LK) metrik kümeleri kullanarak Java programlarının kalitesi ölçülmüştür. Çalışmada bu iki metrik kümesi ağırlıklandırılarak kullanılmıştır [21]. Jiang ise kod seviyesinde metriklerin tasarım seviyesindeki metriklerinden daha iyi performans ortaya konduğunu göstermiş ve iki seviyedeki metriklerin kullanılmasıyla en iyi sonucun alındığını bulmuştur [22]. Subramanyam ve arkadaşları ise CK metrik setini kullanarak Java ve C++ dilinde yazılmış yazılımların hatalarını bulmuş ve sonuçların programlama dillerine göre değiştiğini göstermiştir [19].

III. WEKA VERİ MADENCİLİĞİ YAZILIMI

Weka, makine öğrenimi amacıyla Waikato Üniversitesinde geliştirilmiş ve "Waikato Environment for Knowledge Analysis" kelimelerinin baş harflerinden oluşmuş yazılımın ismidir. Günümüzde yaygın kullanımı olan çoğu makine öğrenmesi algoritmalarını ve metotlarını içermektedir. Java dilinde geliştirilmiş olması ve kütüphanelerinin jar dosyaları halinde geliyor olması sayesinde, JAVA dilinde yazılan projelere kolayca entegre edilebilmesi kullanımını daha da yaygınlaştırmıştır. Yazılım, GNU Genel Kamu Lisansı ile dağıtılmaktadır [23].

Weka, tamamen modüler bir tasarıma sahip olup, içerdiği özelliklerle veri kümeleri üzerinde görselleştirme, veri analizi, iş zekâsı uygulamaları, veri madenciliği gibi işlemler yapabilmektedir. Weka yazılımı, kendisine özgü olarak bir arff uzantısı desteği ile gelmektedir. Ancak Weka yazılımının içerisinde CSV dosyalarını da ARFF formatına çevirmeye yarayan araçlar mevcuttur. Weka ile sınıflandırma, kümeleme ve ilişkilendirme gibi temel veri madenciliği görevleri gerçekleştirilebilir. Bu görevlere ek olarak, veri kümelerinin önışlenmesi ve görselleştirilmesi gibi işlemler de Weka ile yapılabilir. Çalışmada Weka'nın 3.7 geliştirici sürümü kullanılmıştır. Bu sürüm 12 alt sürüme sahiptir.

IV. HAZIRLANAN MODEL VE KULLANILAN METRİKLER

Weka 3.7'nin sürümler arası kalite değişimini değerlendirebilmek için QMOOD' da olduğu gibi hiyerarşik yapıdadır ve seviye içermektedir. Birinci seviye de tasarım kalitesi nitelikleri tanımlanmıştır. Tanımlanan tasarım kalitesi nitelikleri; yeniden kullanılabilirlik (reusability), işlevsellik (functionality), etkinlik (effectiveness), anlaşılabilirlik (understandability), genişletilebilirlik (extendibility), esneklik (flexibility)' tir.

İkinci seviyede ise tasarım kalitesi özellikleri belirlenmiştir. Tasarım kalitesi özellikleri yazılımdaki tasarım birimlerinin niteliklerini, işlevlerini ve aralarındaki ilişkileri doğrudan ele almaktadır. Bu özellikler bir veya birden çok tasarım metrikleri değerlendirebilmektedir [12]. Modelde kullanılan tasarım özellikleri ise Tablo 1'de gösterilmiştir.

Üçüncü seviyede ise nesneye dayalı tasarım metrikleri tanımlanmıştır. Tasarım özelliklerinin hangi tasarım metriği ile ölçüleceğine karar verilirken QMOOD'da yer alan nesneye dayalı tasarım metrikleri incelenmiştir. İncelenen tasarım metrikleri ile iPlasma aracında yer alan metrikler karşılaştırılmış ve örtüşen metrikler seçilmiştir. Örtüşmeyen metrikler için iPlasma aracında yer alan ve tasarım özellikleriyle ilişkilendirilebilen başka metrikler seçilmiştir. Seçilen metrikler Tablo 2'de gösterilmiştir. Dördüncü seviyede ise hangi nesneye dayalı tasarım bileşenlerinin kullanılacağına karar verilmiştir. Bileşen olarak paketler, sınıflar, nitelikler, metotlar ve bunların arasındaki ilişkiler seçilmiştir. Bu bileşenler kullanılarak nesneye dayalı tasarım metrikleri elde edilebilir.

Tablo 1. QMOOD tasarım özellikleri.

1	Design Size (Tasarım Boyutu)
2	Hierarchy (Hiyerarşi)
3	Abstraction (Soyutlama)
4	Encapsulation (Kapsülleme)
5	Coupling (Bağlama)
6	Cohesion (Birleşme)
7	Composition (Kompozisyon)
8	Inheritance (Kalıtım)
9	Polymorphism (Çokşekillilik)
10	Messaging (Mesajlaşma)
11	Complexity (Karmaşıklık)

Tablo 2. Seçilen nesneye dayalı tasarım metrikleri.

Tasarım Metrikleri	Kısaltma	Açıklama
Design Class Size	DSC	Tasarımdaki toplam sınıf sayısı
Number of Hierarchies	NOH	Tasarımdaki toplam sınıf hiyerarşisi sayısı
Abstraction Ratio	AR	Bir paketdeki interface veya abstract olarak tanımlanan sınıf sayısının tüm sınıfların sayısına oranı
Data Access Metric	DAM	Bir sınıftaki private veya protected olarak tanımlanan nitelikleri tüm niteliklerin sayısına oranı
Coupling Between Objects	CBO	Bir sınıfın bağlı olduğu sınıfların sayısı
Tight Class Cohesion	TCC	Bir sınıftaki doğrudan bağlı metod çiftleri sayısının tüm olası metod çifti sayısına oranı
Number Of Attributes	NOA	Bir sınıfta yer alan niteliklerin sayısı
Depth of Inheritance Tree	DIT	Bir sınıfın türetim ağacındaki köke uzaklığı.
Number of Overridden Methods	NOOM	Polimorfik davranış gösteren metod sayısı
Class Interface Size	CIS	Bir sınıfta public olarak tanımlanmış metod sayısı
Number of Methods	NOM	Bir sınıfta tanımlı metod sayısı

Metrikler belirlendikten sonra tasarım kalitesi özellikleri ile seçilen tasarım metrikleri ilişkilendirilmiştir. Bu ilişkilendirme Tablo 3'te gösterilmiştir. Tasarım kalitesi özelliklerinin tasarım kalitesi niteliklerini hangi yönde ve ne kadar etkileyeceğine sezgisel olarak karar verilebilir. Bu çalışmada QMOOD' var olan ilişkilendirme ve ağırlıklandırma temel alınarak Tablo 4'te gösterilen ağırlıklar belirlenmiştir. Belirlenen ağırlıklar kullanılarak her bir tasarım niteliğine ait kalite puanı belirlenir. Sistemin toplam kalitesi 6 kalite niteliğine ait kalite puanının toplanmasıyla elde edilen Toplam Kalite İndeksi ile bulunur.

Tablo 3. Tasarım özellikleri-tasarım metrikleri ilişkisi.

Tasarım Metrikleri	Kısaltma
Design Size	Design Class Size (DSC)
Hierarchy	Number of Hierarchies (NOH)
Abstraction	Abstraction Ratio (AR)
Encapsulation	Data Access Metric (DAM)
Coupling	Coupling Between Objects (CBO)
Cohesion	Tight Class Cohesion (TCC)
Composition	Number of Attributes (NOA)
Inheritance	Depth of Inheritance Tree (DIT)
Polymorph	Number of Protected Methods (NOOM)
Messaging	Class Interface Size (CIS)
Complexity	Number of Methods (NOM)

Tablo 4. Tasarım kalitesi nitelikleri ile tasarım özellikleri arasındaki ilişki ve ağırlıkları (n: negatif, p: pozitif).

	Reusability	Flexibility	Understandability	Functionality	Extendibility	Effectiveness
Design Size	p		n	p		
Hierarchy				p		
Abstraractipn			n		p	P
Encapsulation		p	p			P
Coupling	n	n	n		n	
Cohesion	p		p	p		
Composition		p				p
Inheritance					p	p
Polymorph		p	p	p	p	p
Messaging	p			p		
Complexity			p			
	Reusability	Flexibility	Understandability	Functionality	Extendibility	Effectiveness
Design Size	0,5		-0,33	0,22		
Hierarchy				0,22		
Abstraractipn			-0,33		0,5	0,2
Encapsulation		0,4	0,33			0,2
Coupling	-0,25	-0,25	-0,33		-0,5	
Cohesion	0,25		0,33	0,12		
Composition		0,35				0,2
Inheritance					0,5	0,2
Polymorph		0,5	-0,33	0,22	0,5	0,2
Messaging	0,5			0,22		
Complexity			-0,33			
Toplam	1	1	-1	1	1	1

V. SONUÇLAR

Yazılımlar ile ilgili gözlemlere dayanan genel sonuçlara baktığımızda, bir yazılımın yeni sürümünün yayınlanmasıyla yazılıma yeni yetenekler ve özellikler katılabilir veya yazılımdaki hataların düzeltilmesi sağlanabilir. Bundan dolayı yazılımın çıkan ilk sürümlerinde yapısal değişiklikler fazla olur ve kalite değişimindeki büyük artışlar görülebilir. Aynı zamanda yazılımın kullanılabilirliği de artabilir. İlerleyen sürümlerde ise yazılımdaki hatalar düzeltilir ve yazılımın sağlamlığı ve güvenilirliği artırılır. Çalışmada oluşturulan modelin üretmesi beklenen sonuçlar ise aşağıdaki gibidir:

1. Kalite niteliklerinden yeniden kullanılabilirlik (reusability), işlevsellik (functionality), etkinlik (effectiveness), genişletilebilirlik (extendibility) ve esneklik (flexibility) her sürümde belli oranda artmalıdır. Bunun tersi olarak anlaşılabilirlik ilk sürümlerde düşmelidir [12].

2. İlk sürümlerde yazılıma fazla sayıda sınıflar ve metotlar eklendiğinden işlevsellik (functionality) ve etkinlik (effectiveness) bu sürümlerde daha fazla artmalıdır.

Weka yazılımının 3.7 sürümü geliştirici sürümü olarak bilinmektedir. Bu sürümün 12 tane alt sürümü bulunmaktadır. 12 alt sürüme ait kalite puanlarını hesaplamak için Weka'nın kaynak kodları elde edilmiş ve iPlasma metrik toplama aracı kullanılarak her bir sürüm için seçilen metrikler elde edilmiştir. Metriklerin bir kısmı sistem seviyesinde (DCS, NOH), bir kısmı ise sınıf seviyesindedir. Sınıf seviyesinde elde edilen metriklerin sistem seviyesine çıkarılması için sınıf seviyesindeki metriklerin ortalaması alınmıştır. Weka'nın 12 alt sürümüne ait metrik değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Her bir metriğin aldığı değer aralıkları farklı olduğu için kalite özelliklerinin değişimlerini yorumlamak zordur. Bu durumda sürümler arasında kalite özelliklerinin değişiminin incelenmesi gerekmektedir. Bu işlemi yapabilmek için ilk sürüm referans alınarak diğer sürümlerin metrik değerleri normalize edilmiştir. Normalize edilen bu değerler Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Weka'nın 12 alt sürümüne ait metrik değerleri.

Versiyon	DSC	NOH	AR	DAM	NOA	CBO	TCC	DIT	NOOM	CIS	NOM
3.7.0	1101	466	6,44	7,13	0,803	5,428	0,222	1,332	4,640	14,585	17,268
3.7.1	1175	488	12,89	7,07	0,800	5,380	0,220	1,329	4,670	14,580	17,235
3.7.2	972	432	13,96	6,56	0,773	4,845	0,237	1,319	4,364	13,631	16,251
3.7.3	977	436	13,97	6,58	0,770	4,883	0,240	1,321	4,362	13,669	16,289
3.7.4	981	441	13,99	6,65	0,770	4,878	0,239	1,328	4,402	13,772	16,403
3.7.5	1002	451	14,02	6,67	0,766	4,888	0,235	1,334	4,409	13,772	16,384
3.7.6	1017	463	14,02	6,74	0,764	4,911	0,234	1,348	4,446	13,846	16,481
3.7.7	1022	465	14,01	6,74	0,763	4,913	0,235	1,348	4,454	13,875	16,512
3.7.8	1043	477	14,19	6,72	0,760	4,895	0,234	1,347	4,468	13,985	16,601
3.7.9	1043	477	14,19	6,73	0,760	4,897	0,234	1,347	4,468	13,985	16,601
3.7.10	1066	483	14,41	6,68	0,761	4,887	0,234	1,342	4,432	13,886	16,476
3.7.11	1310	720	14,89	6,34	0,802	4,244	0,229	1,105	3,685	13,144	15,265

Tablo 6. İlk sürüme göre normalize edilmiş metrik değerleri.

Versiyon	DSC	NOH	AR	DAM	NOA	CBO	TCC	DIT	NOOM	CIS	NOM
3.7.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.7.1	1,067	1,047	2,002	0,992	0,996	0,991	0,992	0,998	1,006	1,000	0,998
3.7.2	0,883	0,927	2,168	0,920	0,962	0,893	1,067	0,991	0,940	0,935	0,941
3.7.3	0,887	0,936	2,169	0,923	0,958	0,900	1,078	0,992	0,940	0,937	0,943
3.7.4	0,891	0,946	2,172	0,933	0,958	0,899	1,073	0,998	0,949	0,944	0,950
3.7.5	0,910	0,968	2,177	0,935	0,954	0,901	1,056	1,002	0,950	0,944	0,949
3.7.6	0,924	0,994	2,177	0,945	0,951	0,905	1,055	1,012	0,958	0,949	0,954
3.7.7	0,928	0,998	2,175	0,945	0,950	0,905	1,055	1,013	0,960	0,951	0,956
3.7.8	0,947	1,024	2,203	0,942	0,946	0,902	1,052	1,012	0,963	0,959	0,961
3.7.9	0,947	1,024	2,203	0,944	0,946	0,902	1,052	1,012	0,963	0,959	0,961
3.7.10	0,968	1,036	2,238	0,937	0,947	0,900	1,055	1,008	0,955	0,952	0,954
3.7.11	1,190	1,545	2,312	0,889	0,998	0,782	1,030	0,830	0,794	0,901	0,884

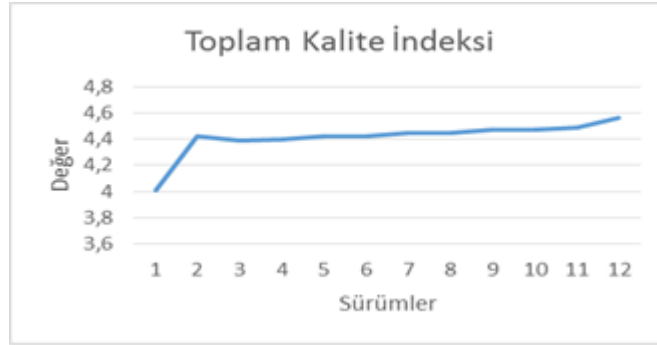
Normalize edilen metrik değerleri ve Tablo 4 yer alan ağırlıklandırılmış tasarım özellikleri kullanılarak, her sürüm için tasarım kalite niteliklerinin değeri hesaplanmıştır. Kalite niteliklerinin değerleri Tablo 7 'de gösterilmiştir. Her sürüm için kalite niteliklerinin aldığı puanlar toplanarak Toplam Kalite İndeksi hesaplanmıştır.

Tablo 7. Hesaplanan kalite niteliği değerleri.

Versiyon	Reusability	Flexibility	Understandability	Functionality	Extendibility	Effectiveness	TKİ
3.7.0	1,000	1,000	-1,000	1,000	1,000	1,000	4,01
3.7.1	1,034	1,001	-1,359	1,025	1,507	1,199	4,42017709
3.7.2	0,952	0,954	-1,265	0,939	1,603	1,196	4,391632496
3.7.3	0,957	0,951	-1,268	0,943	1,601	1,197	4,393892645
3.7.4	0,961	0,959	-1,276	0,949	1,610	1,202	4,418055161
3.7.5	0,966	0,959	-1,292	0,957	1,614	1,204	4,420355675
3.7.6	0,974	0,964	-1,304	0,968	1,621	1,209	4,445122266
3.7.7	0,977	0,964	-1,307	0,971	1,621	1,209	4,448500657
3.7.8	0,991	0,964	-1,326	0,983	1,638	1,213	4,475512045
3.7.9	0,990	0,965	-1,327	0,983	1,638	1,214	4,475683493
3.7.10	0,999	0,959	-1,338	0,987	1,650	1,217	4,487580442
3.7.11	1,108	0,912	-1,311	1,098	1,577	1,165	4,561320189

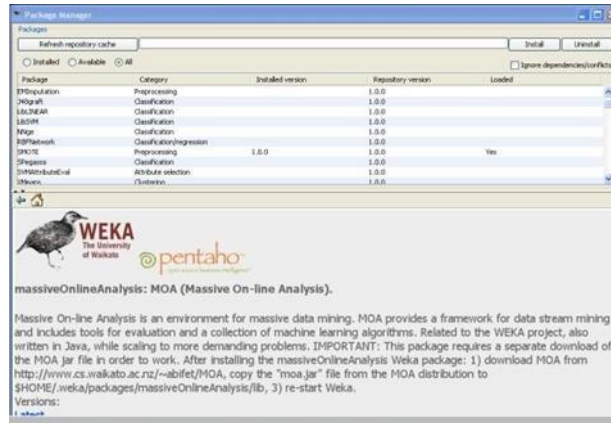
VI. DEĞERLENDİRME

Bir önceki bölümde hesaplanan Toplam Kalite İndeksi puanlarının sürümler arası değişimleri Şekil 1'deki grafikte gösterilmiştir. Kalite niteliklerinin değerleri ayrı olarak incelendiğinde işlevsellik, esneklik ve yeniden kullanılabilirlik 3.7.0 sürümünden 3.7.1 sürümüne geçerken artmıştır. Weka'ya ait kod kayıtları (CodeLogs [24]) incelendiğinde 3.7.1 sürümünde birçok sınıflandırma ve kümeleme algoritmalarının, öznelik seçme ve veri önileme yöntemlerinin eklendiği görülmüştür.

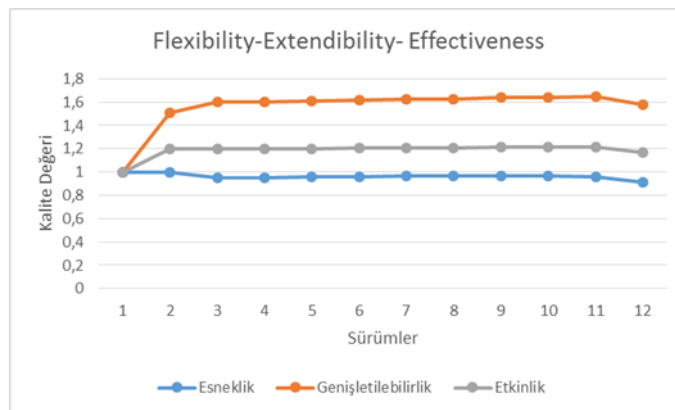


Şekil 1. Sürümler arası toplam kalite indeksinin değişimi.

3.7.1 sürümünden 3.7.2 sürümüne geçildiğinde ise bu üç kalite niteliğinde belirgin düşüş olmuştur. Bundaki en büyük neden Weka yazılımının tasarımında yapılan değişikliktir. Weka'nın 3.7.2 sürümünde tek monolitik çalıştırılabilir jar dosyasından, modüler paket tabanlı sisteme geçmiştir (Şekil 2). 3.7.2 sürümünden en son sürüme kadar işlevsellik ve yeniden kullanılabilirlikte belirli oranda artış olmuştur. Ancak 3.7.10 sürümünden 3.7.11 sürümüne geçerken esneklikte düşüş meydana gelmiştir. Bu duruma neden ise Weka'nın kalıtım yapısında değişiklik olmasıdır. Kod kayıtları incelendiğinde Weka'nın "core" paketinde yer alan algoritmaların hızlandırıldığı ve kodlarda geliştirilme yapıldığı görülmüştür. Aynı zaman da bazı algoritmaların hafıza tüketimlerinde azalma olmuştur (Şekil 3).

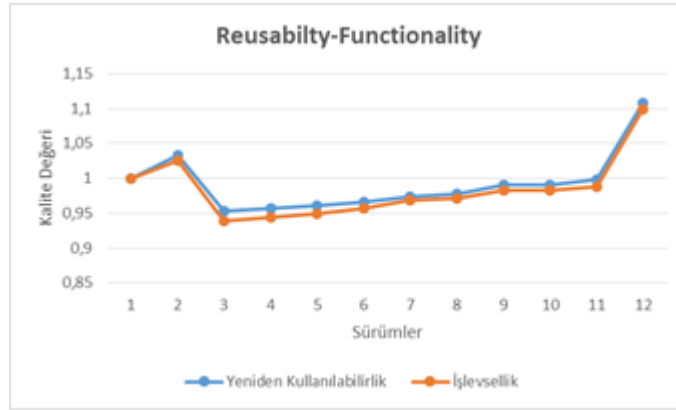


Şekil 2. Weka paket yöneticisi

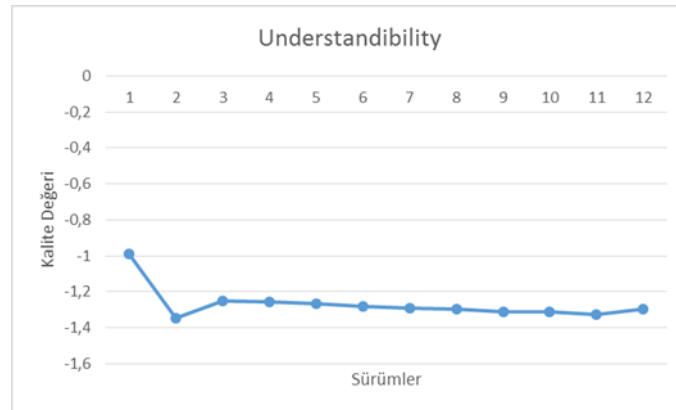


Şekil 3. Esneklik, genişletilebilirlik ve etkinlik kalite niteliklerinin sürümler arası değişimi

Etkinlik ve genişletilebilirlik nitelikleri ise benzer davranış göstermektedir. İki nitelikte de 3.7.0 sürümünden 3.7.1 sürümüne geçerken gözle görülür derecede artış görülmüştür. 3.7.1 sürümünden 3.7.10 sürümüne kadar artış devam ederken 3.7.10 sürümünden son sürüme geçişte ise düşüş meydana gelmiştir. Son sürümde kalıtım hiyerarşindeki değişiklik bu iki niteliği de etkilemiştir. Son sürümde temel sınıf sayısında belirgin derecede artış olmuştur ve 3.7.10 sürümündeki tasarım tamamen değişmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Yeniden kullanılabilirlik ve işlevsellik kalite niteliklerinin sürümler arası değişimi.



Şekil 5. Anlaşılabilirlik kalite niteliğinin sürümler arası değişimi.

Anlaşılabilirlik niteliğinde ise 3.7.0 sürümünden 3.7.1 sürümüne geçerken düşüş meydana gelmiştir. 3.7.1 sürümünde artan metod ve sınıf sayısı anlaşılabilirliği düşürmüştür. 3.7.1 sürümünden 3.7.2 sürümüne geçildiğinde ise anlaşılabilirlik artmıştır. Weka'daki tasarım değişikliği bu durumda en büyük etkidir. Anlaşılabilirlik 3.7.3 sürümünden son sürüme kadar azalma göstermiş, son sürümde ise hafif olarak artmıştır (Şekil 5). Kurulan model ile Weka yazılımının kod kayıtları incelendiğinde tutarlılık olduğu görülmektedir. Bu durum QMOOD'un sürümler arası kalite değişimlerinin bulunmasında etkili bir model olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & Witten, I. H. (2009). The WEKA data mining software: an update. *ACM SIGKDD explorations newsletter*, 11(1), 10-18.
- [2] Bansiya, J., & Davis, C. G. (2002). A hierarchical model for object-oriented design quality assessment. *IEEE Transactions on software engineering*, 28(1), 4-17.
- [3] Marinescu, C., Marinescu, R., Mihancea, P. F., & Wettel, R. (2005). *iPlasma: An integrated platform for*

quality assessment of object-oriented design.

- [4] Jetter, A., Gall, H., Pinzger, M., & Knab, P. (2006). Assessing software quality attributes with source code metrics.
- [5] Dromey, R. G. (1995). A model for software product quality. *IEEE Transactions on software engineering*, 21(2), 146-162.
- [6] Lanza, M., & Marinescu, R. (2007). *Object-oriented metrics in practice: using software metrics to characterize, evaluate, and improve the design of object-oriented systems*. Springer Science & Business Media.
- [7] Padhy, N., Satapathy, S., & Singh, R. (2017). Utility of an object oriented reusability metrics and estimation complexity. *Indian J. Sci. Technol*, 10(3), 1-9.
- [8] McCall, J. A. (1977). Factors in software quality. *US Rome Air development center reports*.
- [9] Basili, V. R. (1992). *Software modeling and measurement: The Goal/Question/Metric paradigm*.
- [10] Caldiera, V. R. B. G., & Rombach, H. D. (1994). The goal question metric approach. *Encyclopedia of software engineering*, 528-532.
- [11] ISO "ISO, IEC 9126", <http://www.iso.org>.
- [12] İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yazılım Tasarımı Kalitesi Ders Notu. (Doç. Dr. Feza Buzluca)
- [13] Jorgensen, P. C. (2018). *Software testing: a craftsman's approach*. CRC press.
- [14] Gil, Y., & Lalouche, G. (2017). On the correlation between size and metric validity. *Empirical Software Engineering*, 22(5), 2585-2611.
- [15] Malhotra, R. (2016). *Empirical research in software engineering: concepts, analysis, and applications*. CRC Press.
- [16] Herbold, S., Trautsch, A., & Grabowski, J. (2017). A comparative study to benchmark cross-project defect prediction approaches. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 44(9), 811-833.
- [17] Goyal, P. K., & Joshi, G. (2014, February). QMOOD metric sets to assess quality of Java program. In *2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)* (pp. 520-533). IEEE.
- [18] Rathore, S. S., & Kumar, S. (2019). A study on software fault prediction techniques. *Artificial Intelligence Review*, 51(2), 255-327.
- [19] Chawla, M. K., & Chhabra, I. (2013). Capturing OO Software metrics to attain quality attributes—a case study. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(6), 359-363.
- [20] Singh, H., & Hassan, S. I. (2015). Effect of SOLID design principles on quality of software: An empirical assessment. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(4).
- [21] Gupta, M., & Singh, S. (2018). Comparative Analysis of Software Design Patterns Based Design Metrics using Machine Learning Algorithms. *Journal of Computer Engineering & Technology*, 9(3), 32-41.
- [22] Radjenović, D., Heričko, M., Torkar, R., & Živkovič, A. (2013). Software fault prediction metrics: A systematic literature review. *Information and software technology*, 55(8), 1397-1418.

[23] URL: www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/, (Erişilme Tarihi: 20.11.2019)

[22] URL:http://wiki.pentaho.com/display/DATAMINING/Pentaho+Data+Mining+Community+Documentation*, (Erişilme Tarihi:20.11.2019)

Araştırma Makalesi - Research Article

Kalça Protezlerinde Loft Tasarım Aracı Kesit Değişimlerinin Gerilme Miktarı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Özkan Küçük^{1*}, Burak Öztürk²

Geliş / Received: 20/03/2020

Revize / Revised: 22/08/2020

Kabul / Accepted: 23/08/2020

ÖZ

Kalça eklemlerinde ileri derecede hasar olmuş hastalarda, kalça protezleri hasarlı eklem yapay bir eklem olarak değiştirilmesi sonucunda kullanılmaktadır. Kalça protezi, kobalt krom veya titanyumdan imal edilen ana parçalar ile bunların eklemleştigi yerde plastik, metal veya seramik ara parçalardan oluşmaktadır. Kalça protezleri ve uygulamaları ile ilgili birçok tasarımsal problemin olduğu bilinmektedir. Bu sorunların çözümü hedeflenerek, endüstriyel tasarıma sahip üç farklı tip tasarım geometrisi seçilmiş ve Catia V5 programı ile modellenmiştir. Bu protezlerin ve femurun montaj tasarımına etkiyen kuvvetler dikkate alınarak, emniyet katsayısı değerleri, sonlu elemanlar yönteminde, mühendislik gerilmeleri altında hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar dikkate alındığında üç farklı endüstriyel tasarım içinden hacim oranı düşük olup gerilme miktarı diğer tasarımlara göre daha düşük olan tasarım tipi belirlenmiştir. Bu tasarımın 6 farklı kesiti içine alan bir loft tasarım aracı ile modellenebileceği gözlemlenmiştir. Bu kesitlerde yer alan profillerin ölçü değişimi ana tasarım geometrisinden 1 mm ofset yapılarak modellenmiştir. Bu modelleme yapılırken Taguchi L₈ deney tasarımı kullanılmıştır. Böylece her bir kesitin mukavemet ve hacim özelliklerine etkisi istatistiksel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Tersine mühendislik ile tasarlanan bu protezlerin hacim miktarı 31285 ile 18438 mm³ ölçüleri arasında değişkenlik göstermektedir. Minimum hacim ve maksimum emniyet katsayısı elde edilebilmesi için gerekli tasarım seçimleri bu sonuçlar dikkate alınarak yapılmıştır. Minimum tasarım için deney tasarımı parametreleri A₂, B₁, C₁, D₂, E₁, F₁ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre hacim 17975mm³ ve gövde de oluşan maksimum gerilme 774 MPa olarak bulunmuştur. Böylece hacim miktarı %4 oranında azaltılırken emniyet katsayısı ise %8 oranında artırılmıştır. Bu sonuçlar dikkate alındığında maksimum emniyet minimum hacim miktarı için elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Kalça Değiştirme, Tasarım Optimizasyonu, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Taguchi Yöntemi, Parametrik Tasarım

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ozkan.kucuk@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-4454>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

²İletişim: burak.ozturk@bilecek.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1018-6545>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

Investigation of the Effects of Loft Design Tool Cross-Section Changes on Stress Amount in Hip Prosthesis

ABSTRACT

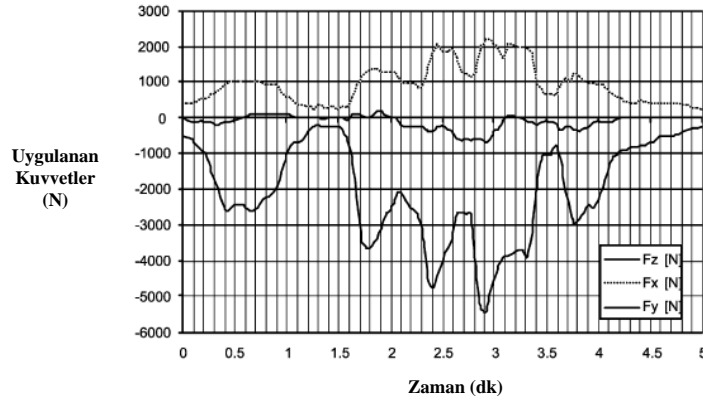
In patients with severe damage to the hip joints, hip prostheses are used as a result of replacing the damaged joint as an artificial joint. The hip prosthesis consists of main parts made of cobalt chrome or titanium and plastic, metal or ceramic spacers where they join. It is known that there are many design problems related to hip prostheses and their applications. With the aim of solving these problems, three different types of design geometry with industrial design were selected and modeled with the Catia V5 program. Considering the forces affecting the assembly design of these prostheses and femur, the safety coefficient values were calculated under engineering stress in the finite element method. Considering these calculations, among three different industrial designs, the design type whose volume ratio is low and the stress amount is lower than the other designs was determined. It has been observed that this design can be modeled with a loft design tool that includes 6 different sections. The size variation of the profiles in these sections is modeled by making 1 mm offset from the main design geometry. Taguchi L_8 experimental design was used for this modeling. Thus, the effect of each section on the strength and volume properties has been analyzed using statistical methods. The volume of these prostheses designed with reverse engineering varies between 31285 and 18438 mm³. Necessary design choices were made by taking these results into consideration in order to obtain minimum volume and maximum safety coefficient. Experimental design parameters for the minimum design were determined as A2, B1, C1, D2, E1, F1. According to these results, the volume was found to be 17975mm³ and the maximum stress on the body as 774 MPa. Thus, the volume amount was reduced by 4%, while the safety factor was increased by 8%. Considering these results, the maximum safety has been obtained for the minimum amount of volume.

Keywords- *Hip Replacement, Design Optimization, Finite Elements Method, Taguch Method, Parametric Design*

I. GİRİŞ

Kalça protezlerinde ideal tasarım geometrisinin elde edilebilmesi için; ilk olarak hasta durum raporlarının ve literatürde yer alan analiz çalışmalarının birlikte ele alınması gereklidir. Total kalça artroplastisinde bir femoral stem kırığı nadir görülen bir komplikasyon olduğu birçok yazar tarafından bildirilmiştir [1-4]. Avrupa’da çeşitli kurumlar bazı revizyon işlemleri bildirilmiştir ve yayınlanan raporlara göre son yıllardaki vaka sayısında bir artış gözlemlenmiştir [5-6]. Literatürde, özellikle modüler bileşenlerin kullanıldığı durumlarda, bu tür komplikasyonların çeşitli vakaları vardır. Kırık normal olarak modüler baş ara yüzünde oluşmaktayken, modüler boyun-gövde ara yüzeyinde de meydana gelmektedir. Uzun bir femur boynu kullanımı, hastanın aktivite seviyesi, gevşeme, varus dizilişi ve metalürjik ve tasarım faktörleri de dâhil olmak üzere kırık riskini artıran birçok faktör olduğu literatürde açıklanmıştır [4,7,8]. Farklı hasta durum raporlarında özellikle kalça protezi tasarım geometrisinde malzeme ve tasarım kaynaklı yorulma davranışına bağlı olarak kırılma vakaları görülmektedir. Ayrıca şimşek çarpması gibi durumlarda da bir hasta durum raporu bildirilmiştir [9]. 77 yaşındaki bir sağlıklı kadın, femur sapının kırılmasından 6 ay önce minimal invaziv total kalça artroplastisi uygulanmıştır. Altı ay sonra, hasta ağır kaldırma sonrası femor ağrısı geçirmiştir ve sonuçlar femoral gövdede kırık olduğunu göstermiştir [10]. 1996 yılında 57 yaşında bir kadında sol kasık ağrısı ortaya çıkmıştır. Sonrasında kalça protezi uygulamasına karar verilmiştir. Ameliyat sırasında hastanın boyu 151 cm ve ağırlığı ise 59 kilogram olarak ölçülmüştür. Çimento protezin bir Centralign kalça protezi kullanılarak spinal anestezi altında gerçekleştirilmiştir. Ameliyattan 4 yıl sonra klinik semptomlar ortaya çıkmıştır [11]. Başka bir hastada ise ameliyattan altı yıl sonra bazı bölgelerde gövde ile çimento arasında kopma görülmüştür. Ameliyattan yedi yıl sonra ise kökün çimento örtüsünden ayrılması ve bazı bölgelerinde osteoliz genişlemiştir. 7,5 yıl sonra protez kullanılamayacak şekilde kırılması sonucunda revizyon yapılmasına karar verilmiştir [12].

Artroplasti uygulamalarında ortalama protez kullanım ömrü 15 yıl olarak belirlenmiştir. Bu bulgularda, 15 yıldan daha kısa sürede protezlerin kırılabildiği gözlemlenmiştir. Özellikle hastanın zamanla aldığı kilo, metalürjik zayıflık, bazı kazalar, vb. etkenlerin kullanım ömrünü azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca birçok farklı tip tasarım geometrisine sahip kalça protezinin artroplasti uygulamalarında kullanıldığı ve belirli bir standarda sahip olmadığı söylenebilir. Bu protezlerin literatürde yer alan sonlu elemanlar yöntemi ile analiz çalışmaları incelenerek protezlerin mukavemet özellikleri ile ilgili güncel çalışmalar rapor edilmiştir. Total veya parsiyel kalça replasmanı, kalça eklemine parçalarının çıkarıldığı ve protez olarak bilinen yapay parçalarla yer değiştirdiği cerrahi bir prosedürdür. [13, 14] Titanyum bazlı alaşımlar, özellikle Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb, eklem protezleri için halen en yaygın kullanılan malzemeler olup, ASTM standardında biyomalzeme olarak tescil edilmiştir. Başarısızlıktan kaçınmak mümkün olmasa da son çalışmalar bir implantın geliştirilmesinde yıkıcı başarısızlıklarını önlemek için tasarım araçlarına odaklanmıştır [15-17]. Total veya parsiyel kalça artroplastisi alanında sayısal yöntemler kullanılarak yapılan birçok çalışmanın amacı, ortopedik implantların genel güvenilirliğini arttırmaktır [18-20]. Böylece, Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ve Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yöntemleri kullanılarak birçok farklı mühendislik problemin sonucu hesaplanabilmektedir. Protezin FEM analizi, Ti-6Al-4V alaşımından yapılmış bir model için düz bir yüzey üzerinde yavaş yürümeyi simule etmek için ABAQUS (Dassault Systèmes) yazılımı kullanılmıştır. Kalça implantının mekanik davranışının ön çalışmaları için, bir malzemenin doğrusal elastik davranışı, iki elastik sabitin bir fonksiyonu olarak analiz edilmiştir. Bir protezde yürüyüş sırasında üç eksen üzerinde oluşan kuvvetleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırmışlardır. Sonlu elemanlar ile stres analizi tekniği, statik yük analizine dayanan yapay kalça eklemlerindeki yük taşıyıcı bileşenlerde tasarım ve malzeme seçimini, hasta aktivitesi sırasında en yüksek yükü seçerek optimize etmek için kullanılmaktadır. Bu nedenle bir çarpma sırasında kalça protezi kullanıcısında oluşan kuvvetler sonlu elemanları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu analiz sırasında uygulanan kuvvetler ve sabitlenen yüzeyler şekil 1’de verilmiştir [23]. Bu makalede literatürden farklı olarak, bir kalça protezinin tasarım geometrisini oluşturabilmek için, çoklu kesitten yüzey oluşturma işlemi olan loft tasarım aracındaki taslakların optimum ölçüleri araştırılmıştır. Tersine mühendislik ve Taguchi Metodu ayrıca bu araştırmada ideal tasarım geometrisinin modellenmesi için uygulanmıştır.



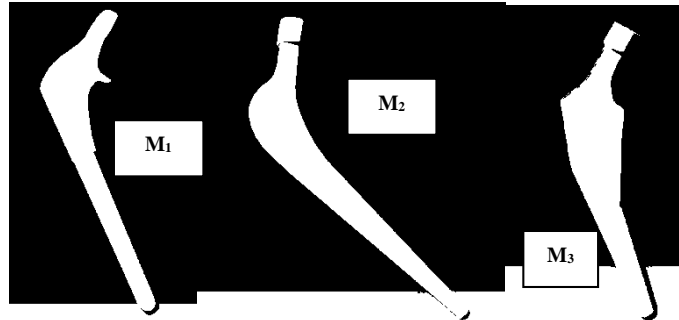
Şekil 1. Bir yere çarpma sonucunda kalça protezinde oluşan kuvvetler [23].

II. MATERYAL VE METOT

Endüstride kalça protezleri birçok farklı tip tasarım geometrisine sahip olarak üretilmektedir ve bu model geometrileri tasarım patentleri ile tescil edilmektedir. Şekil 2’de yer alan üç farklı tip protez tasarımları endüstride üretimi en yaygın olan geometri tipleri olduğu belirlenmiştir. Catia V5 programı tersine mühendislik aracı kullanılarak bu üç tasarım geometrileri modellenmiştir (Şekil 3).

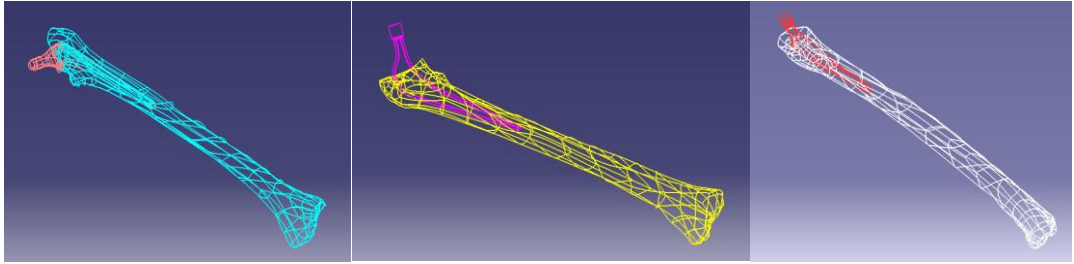


Şekil 2. Üç farklı tip tasarım geometrisine sahip protez tasarımları



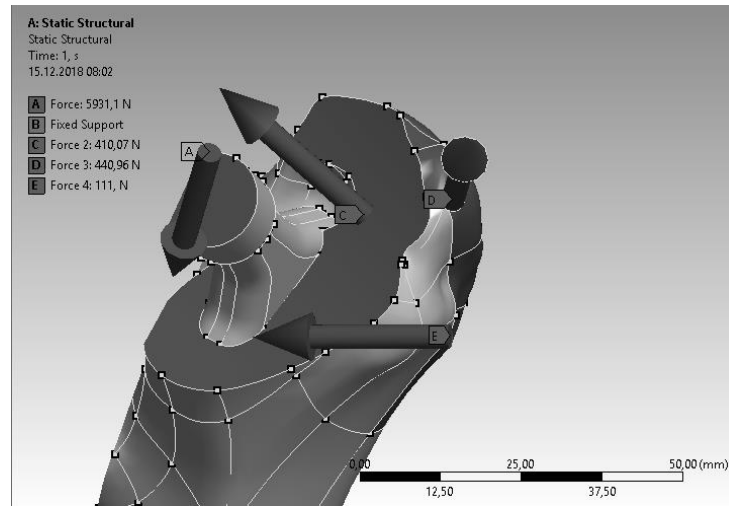
Şekil 3. Tasarımı yapılan üç farklı tip model geometrisi

Artroplasti uygulamalarında femur kemiğine kalça protezinin montajı özel bir çimento veya vidalı birleştirme yardımıyla yapılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kalça protezlerinin gerilme dağılım analizleri yapılabilmesi için; femur kemiği ile protezlerin montaj tasarımı yapılmıştır (Şekil 4). Ti₆Al₄V ve kemik malzemelerinin ANSYS-Workbench malzeme kütüphanesinde tanımlanmış mekanik özellikleri Tablo 2’de yer almaktadır.



Şekil 4. Farklı tip tasarımların montaj tasarımı

Yürüyüş sırasında bir kalça protezinde dört farklı bölgede gerilmelerin oluştuğu rapor edilmiştir [23]. Bu kuvvetler referans alınarak femur ve kalça protezi üzerinde seçimler yapılmıştır (Şekil 5). Böylece sonlu elemanlar yöntemi ile gerçek koşullar altında analiz çalışması yapılabilecektir [24].



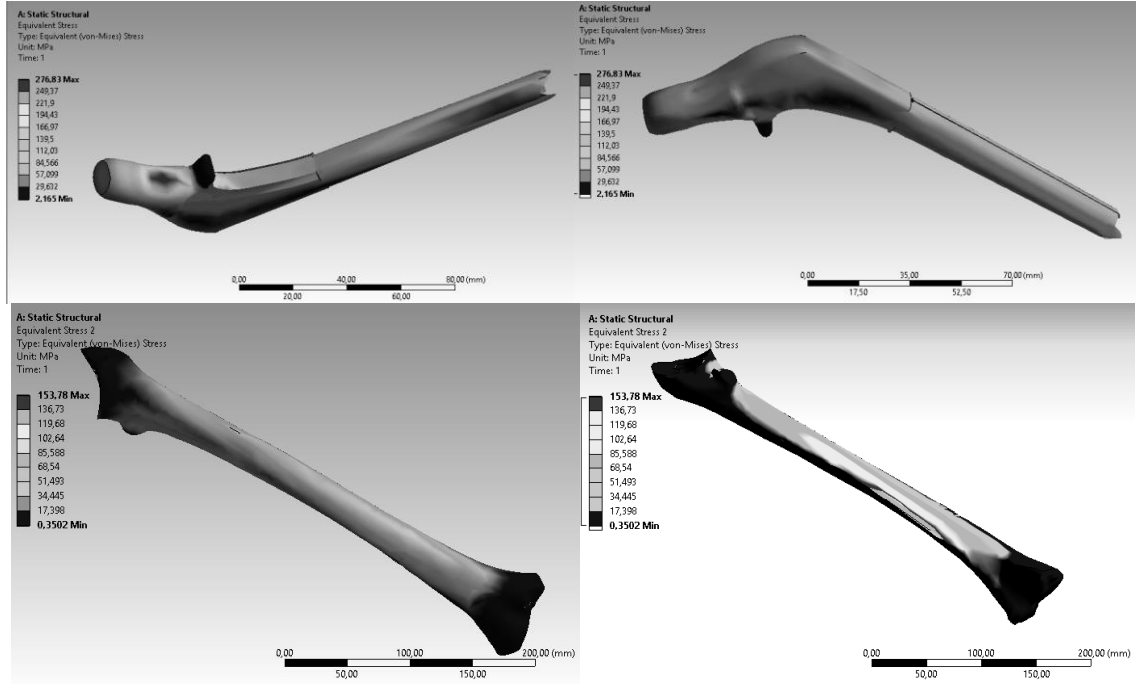
Şekil 5. Montajda tanımlanan kuvvetler

Tablo 1. Malzeme Özellikleri femur (solda), Ti₆Al₄V sağda (sağ)

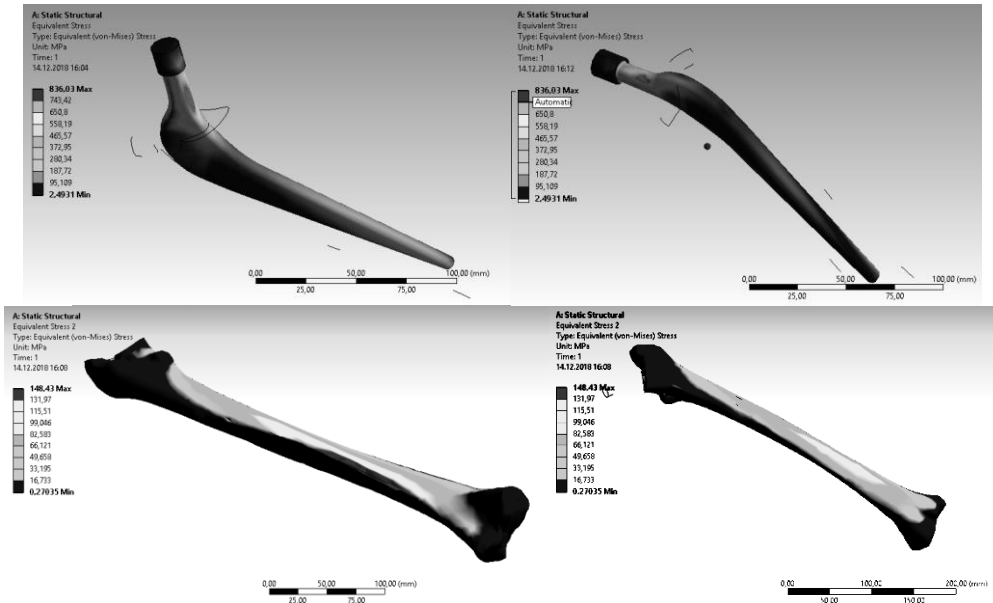
	Özkütle	Young Modülü	Poission Oranı	Akma Dayanımı
Femur	1990	16200	0,38	114
Ti ₆ Al ₄ V	4430	1e+05	0,32	830

Farklı geometrilere sahip kalça protezlerinin montaj tasarımları; belirlenen malzeme özellikleri tanımlanarak ve kuvvetler uygulanarak mühendislik gerilmeleri için ANSYS 15 programında maksimum gerilme miktarı hesaplamaları yapılmıştır. Her bir analiz çalışmasının gerilme dağılımı sonuçları femur ve protezler için şekil 6-8’de yer almaktadır. Bu sonuçlara göre protez üzerinde oluşan gerilme değişimlerinin; protez yüzeyi üzerinde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Protezlerin yüksek emniyet katsayısı sergilemesi istenirken, femur

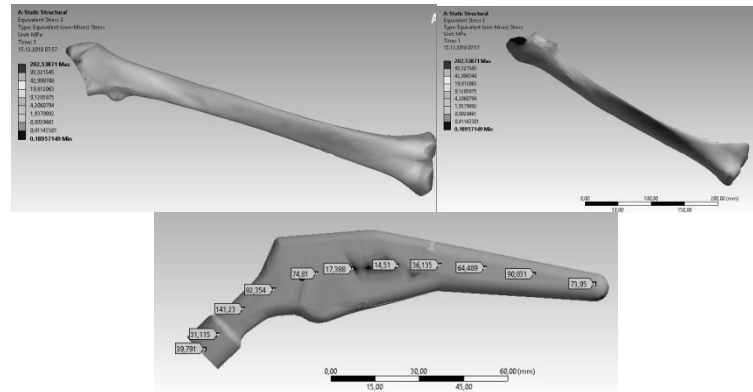
emniyet katsayısının protezin altına düşmemesi için optimum tasarım geometrisinin seçiminin yapılması gereklidir.



Şekil 6. M_1 için yüzeylerde oluşan gerilme dağılımı sonuçları



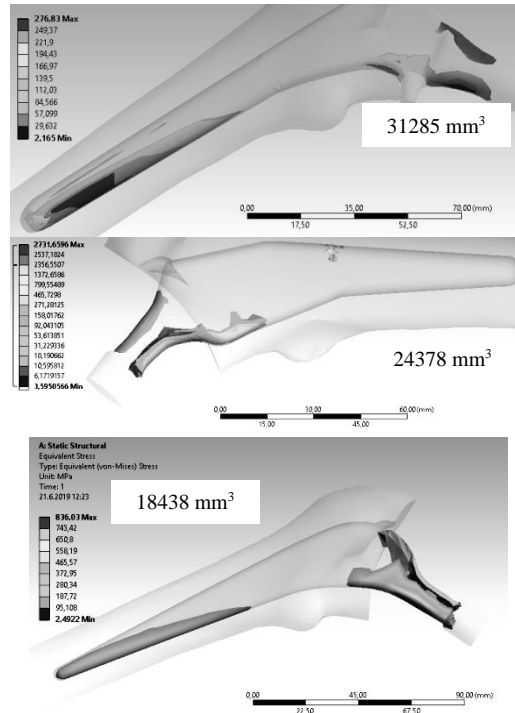
Şekil 7. M_2 için yüzeylerde oluşan gerilme dağılımı sonuçları



Şekil 8. M₃ için yüzeylerde oluşan gerilme dağılımı sonuçları

III. TAGUCHİ VE ANOVA VARYANS ANALİZİ

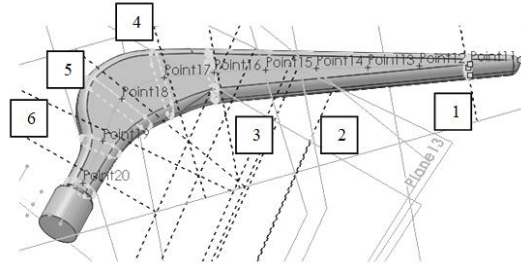
Sonlu elemanlar yardımıyla yapılan analiz sonuçları incelendiğinde; gerilme dağılımlarının farklı değerlere sahip olduğu ve geometri yüzey alanlarında çok değişken değerler sahip olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 9). Üç farklı tasarımın gerilme dağılım sonuçları ele alındığında 1. Tasarımın hacim değeri en yüksek modeldir. Bununla birlikte bu geometrinin gerilme miktarı oldukça azdır. İkinci tasarımın hacmi nispeten 1. Tasarıma göre düşük olsa da 3. Tasarıma göre yüksektir. Fakat gerilme miktarı çok düşüktür. Üçüncü tasarımın gerilme miktarı çok yüksek olsa da hacim miktarı çok düşüktür. Bu tasarım geometrisinin üç farklı model geometrisi içinde en ideal geometri olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9. Modeller için gerilme değişimlerini model dağılımı

Bu tasarım geometrisi incelendiğinde “Loft” tasarım aracı yardımıyla 6 farklı kesit ile oluşturulabileceği gözlemlenmiştir (Şekil 10). Altı farklı kesitin her biri ofset araç çubuğuyla 1 mm kalınlaştırılabileceği, böylece emniyet katsayısının artırılabilmesi düşünülmektedir.

Bununla birlikte hacmin optimum değerinde olması için her bir kesitin mukavemet sonuçlarında etki oranlarının belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Bilimsel araştırmalarda Taguchi yöntemi kullanılarak bir çok farklı optimizasyon araştırması yüksek güvenilirlik oranı ile tamamlanmıştır [25-29]. Bu çalışmada da Taguchi L₈ ortogonal deney tasarımı kullanılarak parametrik tasarım yapılmasına karar verilmiştir. Böylece minimum hacim ve maksimum emniyet katsayısı elde edilebilecektir.



Şekil 10. Tasarımı oluşturan altı farklı kesit

6 farklı tasarım parametresi ve iki farklı seviyesi için Tablo 2’de yer alan Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur. Bu deney tasarımının birinci seviyesi her bir kesit profilinin ofset verilmemiş değeri iken, ikinci seviyesi ise dışa doğru 1 mm ofsetli şeklidir. Böylece her bir kesitin mukavemet ve hacim özelliklerine etkisi istatistiksel yöntemler kullanılarak incelenebilecektir. Her bir deney tasarımı için geometriler modellenerek şekil 5’de yer alan kuvvetler altında yeniden ANSYS programında analiz edilmiştir. Farklı tasarımların gövde ve sap kısımlarının ayrı ayrı olarak maksimum gerilme miktarları ölçülmüştür (Tablo 2.).

Tablo 2. L₈ Taguchi Deney tasarımı parametreleri ve seviyeleri

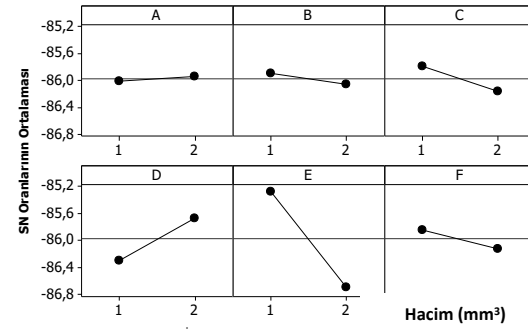
P1	P2	P3	P4	P5	P6	Hacim (mm ³)	Gövde Ger. Mik. (MPa)	Sap Ger. Mik. (MPa)
1	1	1	1	1	1	18439	1015	148
1	1	1	2	2	2	20336	1023	175
1	2	2	1	1	2	19714	856	143
1	2	2	2	2	1	21519	803	146
2	1	2	1	2	1	21958	998	169
2	1	2	2	1	2	18365	928	160
2	2	1	1	2	2	22685	791	141
2	2	1	2	1	1	16922	805	168

Hacim ve Maksimum Gerilme Miktarı Değişimleri için kontrol faktörlerinin her kombinasyonu Taguchi deney tasarımında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile ölçülür. Kontrol faktörlerinin optimizasyonunda S/N oranları kullanılır. Hacim miktarının ve Maksimum Gerilme Miktarının düşük olması ürün kalitesi, maliyeti ve ömrü açısından büyük bir öneme sahiptir. S/N değerlerinin hesaplanmasında Eş.1,2 ve 3 kullanılmaktadır. Minitap programında Taguchi Analizi yapılarak şekil 11’de yer alan S/N oranları hesaplanmıştır. Bu sonuçlar optimum tasarım seviyelerinin seçilmesinde bize yol göstermektedir. Minimum hacim ve maksimum emniyet katsayısı elde edilebilmesi için gerekli tasarım seçimleri bu sonuçlar dikkate alınarak yapılmıştır.

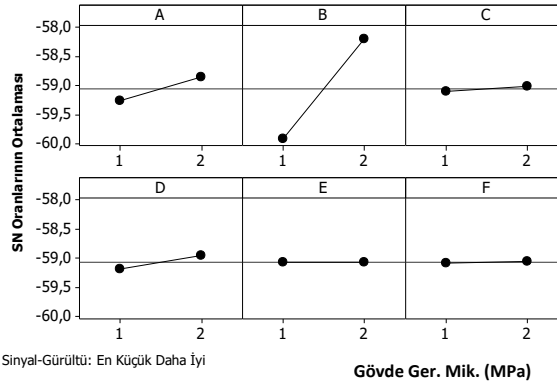
$$\text{Nominal en iyidir : } SN_N = -10 \log \left(\frac{\overline{y^2}}{S} \right) \quad (1)$$

$$\text{En büyük en iyidir: } SN_L = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{En küçük en iyidir: } SN_S = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (3)$$

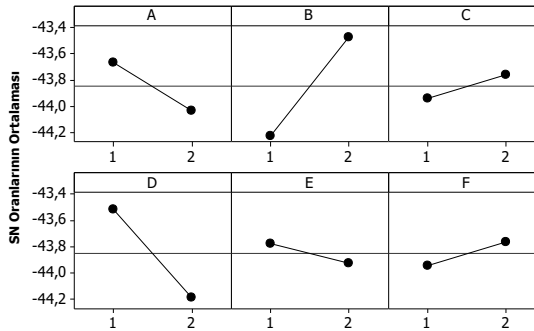


Sinyal-Gürültü: En Küçük Daha İyi



Sinyal-Gürültü: En Küçük Daha İyi

Gövde Ger. Mik. (MPa)



Sinyal-Gürültü: En Küçük Daha İyi

Sap Ger. Mik. (MPa)

Şekil 11. Hacim Değişimleri, Gövde Gerilme Miktarları ve Sap Gerilme Miktarları için S/N oranları

Deney tasarımı bir çok farklı alanda optimum koşulların belirlenmesi için kullanılmaktadır [30,31]. Optimum tasarım için deney tasarımı parametreleri A₂, B₁, C₁, D₂, E₁ ve F₁ olarak bulunmuştur. Bununla birlikte protezin sap ve gövde tasarımı için optimum deney tasarımı parametrelerinin seviyeleri farklılık göstermiştir.

Tablo 2’de yer alan değerler dikkate alındığında gövdede oluşan gerilme miktarı daha fazla olduğu için tasarım yapılırken bu bölgede optimum koşulların dikkate alınmasının gerektiği gözlemlenmiştir. Böylece A₂, B₂, C₂, D₂, E₁ veya E₂ ve F₂ parametreleri ve seviyelerinin seçilmesinin gerektiği belirlenmiştir. Minimum hacim ve maksimum emniyet katsayısını bulmak için ise Anova Varyans analizi yapılmıştır. Çünkü, hacim ve gerilme miktarı seçiminde ortak olmayan seviyelerde % etkinin dikkate alınması çok önemlidir ve bu yüzden Minitap programında varyans analizi yapılmış ve Tablo 3’deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3. Varyans analizi sonuçları

Hacim;						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	761	761	761	0,00	0,976
B	1	379320	379320	379320	0,70	0,556
C	1	1259284	1259285	1259285	2,33	0,369
D	1	3995965	3995964	3995964	7,40	0,224
E	1	21313920	21313920	21313920	39,49	0,100
F	1	639581	639581	639581	1,18	0,473
Error	1	539760	539760	539760		
Total	7	28128591				
S = 734,684 R-Sq = 98,08% R-Sq(adj) = 86,57%						
Gövde;						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	3828	3828	3828	1,46	0,440
B	1	62835	62835	62835	23,91	0,128
C	1	300	300	300	0,11	0,793
D	1	1275	1275	1275	0,49	0,613
E	1	15	15	15	0,01	0,952
F	1	66	66	66	0,03	0,900
Error	1	2628	2628	2628		
Total	7	70948				
S = 51,2652 R-Sq = 96,30% R-Sq(adj) = 74,07%						
Sap;						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	84,5	84,5	84,5	0,19	0,740
B	1	364,5	364,5	364,5	0,81	0,533
C	1	24,5	24,5	24,5	0,05	0,854
D	1	288,0	288,0	288,0	0,64	0,570
E	1	18,0	18,0	18,0	0,04	0,874
F	1	18,0	18,0	18,0	0,04	0,874
Error	1	450,0	450,0	450,0		
Total	7	1247,5				
S = 21,2132 R-Sq = 63,93% R-Sq(adj) = 0,00%						

IV. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Endüstride ve literatürde bir çok farklı tip protez geometrisi yer almaktadır. Bu yüzden bir çok farklı yöntem kullanılarak optimum tasarım elde edilebilmektedir. Bu analiz sonuçları ile gerilme miktarının yüksek olduğu bölgeler belirlenerek bu bölgeler mukavemet artırıcı tasarımsal değişikliklere tabi tutulacaktır. Böylece tasarımlar kırılma olasılığı yüksek olan bölgeler için güçlendirilebilecektir. Ayrıca gerilmenin az olduğu bölgelerde tasarım ağırlığı azaltılabilecektir. Bunun sonucunda tasarım hafifletilebilecektir. Farklı tip tasarım geometrilerinin gerilme dağılım grafikleri birbirinden farklı sonuçlar vermiştir. M₃ tasarımında gerilme miktarının daha az oluşacağı belirlenmiştir. M₁ tasarımında ise özellikle sap kısmında gerilmenin çok fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar hasta durum raporlardaki kırılma şekilleri ile benzerlik göstermiştir [9, 10, 12]. Bu da sonlu elemanlar analizinin doğru bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Kemikte oluşan gerilme sonuçları incelendiğinde M₁ kemiğinde 153 MPa, M₂ kemiğinde 148 MPa ve M₃ kemiğinde 202 MPa maksimum gerilme gözlemlenmiştir.

Bu araştırmada, Taguchi Metodu kullanarak bir kalça protezinin tasarımına karar verilebileceği öngörölmüştür. Minimum hacim ve gövdede oluşan gerilmelerin optimum seviyeleri belirlenirken ilk olarak ortak parametre seviyeleri incelenir. Buna göre A_2 , D_2 ve E_1 seçimi ortak parametre seviyeleridir. Bunun dışında kalan parametreler etki oranları dikkate alınarak yapılmıştır. Buna göre B parametresi incelendiğinde bu parametrenin gerilmeye etkisi hacimden daha fazladır. Bu yüzden B_2 seviyesi seçilmelidir. C için ise hacim miktarına etkisi daha yüksek olduğundan C_2 seviyesi seçilmelidir. F parametresinde de C'de olduğu gibi hacim miktarına etkisi daha yüksek olduğundan F_1 seçilmelidir. Bu sonuçlar için hacim 17975mm^3 ve gövde de oluşan maksimum gerilme 774 Mpa dır. Sonuç olarak maksimum emniyet, minimum hacim miktarı için elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenen 2018-01.BŞEÜ.03-04 numaralı proje kapsamında yürütölmüştür. Yazarlar, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesine mali desteklerinden dolayı teşekkür etmektedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Dangles, C. J., Altstetter, C. J. (2010). Failure of the modular neck in a total hip arthroplasty. *J Arthroplasty*, 25 (7), 1169, 5-7.
- [2] Sotereanos, N. G., Sauber, T. J., Tupis, T. T. (2013). Modular femoral neck fracture after primary total hip arthroplasty. *J Arthroplasty*, 28 (1), 196. 7-9.
- [3] Morley, D., Starks, I., Lim J. (2012). A case of a C-Stem fracture at the head-neck junction and a review of the literature. *Case Rep Orthop*, Article ID 158604
- [4] Baratz, M. D., Abdeen, A. (2014). Fracture of a tapered femoral neck after total hip arthroplasty. *JBJS Case Connect*, 4 (1), 1-4.
- [5] Garellick, G, K€arrholm, J, Rogmark, C, Rolfson, O. (2012). Swedish Hip Arthroplasty Register: Annual Report; Available at: www.shpr.se/en/
- [6] National Joint Registry for England. Report Wales and Northern Ireland. 7th Annual Report, 2010-2014. Available at: www.njrcentre.org.uk.
- [7] Charnley J. (1975). Fracture of femoral prostheses in total hip replacement. A clinical study. *Clin Orthop.*, 11:105-120.
- [8] Galante, J. O. (1980). Causes of fractures of the femoral component in total hip replacement. *J Bone Jt Surg Am.*, 62(4), 670-673.
- [9] Lizano-Díez, X, Alentorn-Geli, E, León-García, A, Marqués-López, F. (2016). Fracture of the femoral component after a lightning strike injury: A case report. *Acta Orthop Traumatol Turc*, 51(1), 84-87.
- [10] Benthien, J. P., & Siepen, W. (2014). Early failure of a non-cemented femoral stem after minimal-invasive total hip arthroplasty: cause analysis and classification. *Musculoskeletal surgery*, 98(1), 77-80.
- [11] Mulroy, W. F., Estok, D. M., Harris, W. H. (1995). Total hip arthroplasty with use of so-called second-generation cementing techniques. *J Bone Joint Surg*, 77(12), 1845-52.
- [12] Yamasaki, S., Masuhara, K., Fuji, T. (2006). Fracture of the precoated femoral component after cemented total hip arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Science*, 11(3), 308-311.
- [13] Park, J. B. (2000). Hip Joint Prosthesis Fixation-Problems and Possible Solutions. *The Biomedical Engineering Handbook*, Second Edition, CRC Press LLC, 46.1 - 46.3

- [14] Jeffrey, N. K. (2006). Total joint replacement in osteoarthritis. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 20(1), 145–153.
- [15] Griza, S., Zanon, G., Silva, E.P., Bertoni, F., Reguly, A., Strohaecker, T.R. (2009). Design aspects involved in a cemented THA stem failure case. *Engineering Failure Analysis*, 16(1), 512–520.
- [16] Hernandez-Rodriguez, M. A. L., Ortega-Saenz, J. A., Contreras-Hernandez G..R. (2010). Failure analysis of a total hip prosthesis implanted in active patient. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 3, 619–622.
- [17] Paliwal, M., Allan, D. G., Filip, P. (2010). Failure analysis of three uncemented titanium-alloy modular total hip stems. *Engineering Failure Analysis*. 17(5), 1230–1238.
- [18] Bennett, D., Goswami, T. (2008). Finite element analysis of hip stem designs. *Materials & Design*. 29(1), 45–60
- [19] Senalp, A. Z., Kayabaşı, O., Kurtaran, H. (2007). Static, dynamic and fatigue behavior of newly designed stem shapes for hip prosthesis using finite element analysis. *Materials and Design*, 28, 1577–1583.
- [20] Niesłony, P., Grzesik, W., Laskowski, P., Sienawski, J. (2014). Numerical and Experimental Analysis of Residual Stresses Generated in the Machining of Ti6Al4V Titanium Alloy. 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), *Procedia CIRP*, 13, 78–83.
- [21] Katarina Colic, Aleksandar Sedmak, Aleksandar Grbovic, Uros Tatic, Simon Sedmak, Branislav Djordjevic, (2016), Finite Element Modeling of Hip Implant Static Loading, *Procedia Engineering*, 149, 257-262.
- [22] Kayabaşı, O., Erzincanlı, F. (2006) Finite element modeling and analysis of new cemented hip prosthesis. *Advances in Engineering Software*, 37, 477-483.
- [23] El'Sheikh, H. F., MacDonald, B. J., Hashmi, M. S. J. (2003). Finite element simulation of the hip joint during stumbling: a comparison between static and dynamic loading. *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144, 249-255,
- [24] Black, J., Hastings, G. (1998). *Handbook of Biomaterial Properties*, Chapman & Hall, London., Springer US10.1007/978-1-4615-5801-9
- [25] Nas E and Öztürk B. (2018). Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials. *Mater Test*, 60, 519-524.
- [26] Öztürk, B, Uğur, L, Erzincanlı, F, Küçük, Ö. (2018). Optimization of Polyethylene Inserts Design Geometry of Total Knee Prosthesis". *International Scientific and Vocational Studies Journal* 2, 31-39
- [27] Kara F and Öztürk B. (2018). Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard machining of DIN 1.2738 mold steel. *Sensor Rev* 2018; 39. <https://doi.org/10.1108/SR-12-2017-0266>
- [28] Öztürk, B. ve Küçük, Ö., (2019). Bakır ve Pirinç Talaşı ile Takviye Edilmiş Boru Bağlantı Elemanlarının İki Farklı Üretim Türü İçin (SEC) Özel Enerji Tüketim Modeli. *Politeknik Dergisi*, DOI: 10.2339/politeknik.473105.
- [29] Öztürk, B., Erzincanlı, F., Development of femoral component design geometry by using DMROVAS (design method requiring optimum volume and safety), www.emeraldinsight.com/0264-4401.htm7
- [30] Kara, F., Takmaz, A., (2019). Optimization by the Taguchi method of effect on the surface roughness of cryogenic treatment applied to cutting tools, *Material Testing*, 61(11): 1101-1104.

- [31] Kara, F., (2018). Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic mold steel, *Materials and Technology*, 52(2):195–200.

Araştırma Makalesi - Research Article

Lif Katkılı Betonlarda Fiber Oranının Basınç Dayanımına Etkisinin Deneysel ve Nümerik İncelenmesi¹

Mohammad Manzoor Nasery², Elif Ağcakoca^{3*}, Zeynep Yaman⁴

Geliş / Received: 25/03/2020

Revize / Revised: 02/11/2020

Kabul / Accepted: 03/11/2020

ÖZ

Günümüzde hızla gelişen teknolojinin sonucu olarak, insanların daha rahat yaşam bulabilecekleri kentsel yaşamı tercih etmeleri, betonarme çok katlı yapı kültürünün hâkim olduğu kentlerde, doğal afetin etkisine karşı yeterli dayanıma sahip yapı inşa etme arayışını beraberinde getirmektedir. Özellikle yüksek katlı yapılarda kullanılan malzemelerden beklenen yüksek dayanım ve kullanılabilirlik, inşaat sektörünü yeni teknolojiler ile üretilmiş malzeme arayışına yönlendirmektedir. Son yıllarda iki veya daha fazla sayıda, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin üstün özellikleri kullanılarak oluşturulmuş kompozit elemanlar, inşaat sektörü alanına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Bu malzemelerin başında mühendisliğin hertürlü alanında geniş kullanıma sahip fiber malzeme gelmektedir. Özellikle beton içine uygulanan, fiber donatı olarak tanımlanan malzeme, püskürtme veya saha betonuna süneklik özelliği kazandırmaya çalışılmaktadır. Genel olarak literatürde ve pazarlamaya yönelik ARGE laboratuvarlarında fiber donatı takviyeli betonun, eğilme etkisi altındaki davranışı incelenmekte olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada fiber donatılı takviye edilmiş betonun, aksel basınç etkisi altındaki yapı elemanlarında kullanılması durumunda sergileyeceği davranış incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, beton karışım içine ilave edilen farklı oranda fiber ile dört farklı beton sınıfından üretilen on iki adet silindirik numune üzerinde aksel basınç deneyleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında; farklı dayanıma sahip beton numunelere, farklı oranda fiber ilave edilmesinin, beton basınç dayanımı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca çalışmada beton numunelerinin sonlu eleman modeli, Beton Plastikleşme Hasar Modeli yardımıyla hazırlanmıştır. Sonrasında, Abaqus/Standart sonlu eleman programı kullanarak numuneler analiz edilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılarak sonlu eleman programı doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Beton, Fiber Donatı, Kompozit, Sonlu Eleman Modeli, Aksel Basınç

¹Sunulan makale 4-6 Mayıs 2018 tarihinde gerçekleştirilen “2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management” sempozyumunda sunulan bildiri geliştirilerek hazırlanmıştır.

²İletişim: manzoor.nasery@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-3787-1355>)

İnşaat Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 61080, Trabzon, Türkiye

^{3*}Sorumlu yazar iletişim: elifd@sakarya.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8228-0592>)

İnşaat Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Esentepe Kampüsü, Sakarya, Türkiye

⁴İletişim: zdyaman@sakarya.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0987-6685>)

İnşaat Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Esentepe Kampüsü, Sakarya, Türkiye

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Fiber Reinforcement on Compressive Strength in Fiber Reinforced Concrete

ABSTRACT

Today, as a result of the rapidly developing technology, people prefer urban living environments where they can find a more comfortable life, as well as seeking to build a structure that is sufficiently resistant to the effect of dynamic loads, in addition to all kinds of natural disasters in cities where reinforced concrete (RC) multi-stores building type is dominant. The high strength and usability expected from the materials used in high-rise buildings direct us to the search for materials produced with new technologies. Especially in recent years, composite elements created by using superior properties of two or more materials of the same or different groups have given a new perspective to the construction sector. One of these materials is fiber material, which has wide usage in engineering field. It is tried to gain mechanical properties such as elasticity and ductility to concrete used in spraying or on-site concrete applications with the material defined as fiber reinforcement especially in concrete. In general, it has been observed that the mechanical properties of fiber reinforced concrete in bending effect are examined in the literature and R&D laboratories for marketing. To this end, in the study, the mechanical behaviors of fiber reinforced concrete in case of use in the structural elements under the influence of axial pressure are examined. In the experimental study, concrete pressure tests were carried out on twelve cylindrical samples produced from four different concrete classes with a different proportion of fiber added to the concrete mixture. Scope of work, the effects of adding a different proportion of fiber to concrete samples with different strength on concrete compressive strength was investigated. In addition, the finite element model of the concrete samples was analyzed with the help of the Abaqus / Standard finite element program using the Concrete Plasticization Damage Model and verified by comparison with the experimental results data.

Keywords- Concrete, Fiber Rebar, Composite, Finite Element Model, Axial Compressive

I. GİRİŞ

Çimento malzemesinin 19. yüzyılın başlarından itibaren fabrika ortamında üretilmeye başlanması ile beton malzemesi yapılarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Beton, içerisinde yaklaşık %10 oranında çimento, %75 oranında agrega (kum, çakıl, kırma taş), %15 oranında su (çimento ağırlığının %2 sinden fazla olmamak üzere), katkı maddelerinin uygun oranlarda ve koşullarda karıştırılması ile oluşturulan kompozit bir yapı malzemesidir [1]. Her yapı malzemesinde olduğu gibi kompozit yapı malzemeleri de mekanik özellikleri esas alınarak tanımlanmakta ve sınıflandırılmaktadır. Beton sınıflandırılırken, betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı dikkate alınmaktadır. Yapı elemanların oluşturulmasında betonun yaygın bir şekilde tercih edilmesinin en önemli nedeni, yüksek basınç mukavemeti ve farklı hava şartlarına karşı diğer yapı malzemelerinden daha dayanıklı olmasıdır.

Büyük şehirlerde nüfusun belirli bölgelerde toplanması, yapıların yüksek katlı olması ihtiyacını ortaya çıkarmış, teknolojinin ilerlemesiyle bu tür ihtiyaçları karşılamak için inşaat sektörü de çözüm arayışına girmiştir. Özellikle yüksek katlı binalarda, yapıya etkileyen tüm riskli yükleme durumları belirlenerek, çekme ve basınç dayanımı yüksek, yeni nesil malzeme kullanması tercih edilebilmektedir. Yapılara etkileyen yüklere karşı yapının taşıma gücünü artırmak için, farklı yapı sistemleri ve dayanımı artırılmış farklı malzemelerin oluşturduğu kompozit elemanlar kullanılabilir. Özellikle yüksek katlı modern yapılarda çok yaygın olarak, betonun dayanımının artırılması talebi, sektörü malzeme konusunda yeni arayışlara yönlendirmektedir [2].

Beton dayanımının artırılmasına yönelik olarak üretilen yeni nesil bir malzeme olan fiber (lif) donatı takviyesi özellikle saha betonu uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiber donatı olarak tanımlanan lif malzemelerin, cam lif, karbon lif, poliamid lif gibi türevleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, ham madde olarak poliamid malzeme kullanılarak üretilmiş sentetik fiber, farklı oranlarda ve farklı basınç dayanımlarına sahip beton karışımlar içine konularak, oluşturulan yeni kompozit elemanın beton basınç dayanımında meydana getirdiği değişim incelenmiştir. Ayrıca sonlu eleman çözümünden elde edilen veriler, deneysel veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

II. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Mevcut çalışmalarda; farklı beton sınıfına sahip beton numunelerine ve farklı oranda çelik lif takviye edilerek oluşturulan numunelerinin, basınç ve eğilme kuvveti etkisi altındaki dayanımı incelenmiştir [3]. Benzer çalışmada, %0,2-%0,6 arasında değişen oranda cam lif takviye edilen silindirik geometriye sahip beton boruların taşıma gücü deneysel olarak araştırılmıştır. Eksenel basınç deneyi sonucunda; lif oranı arttıkça, elemanın deplasman değeri artmış, elemanda kopma ve kırılmalar olmadan daha fazla yük taşıdığı belirlenmiştir [4]. Çelikten (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; yüksek dayanımlı betona çelik lif ilave edilerek, çelik lifin yüksek dayanımlı beton davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Fiber kullanarak yüksek basınç dayanımı, süneklik ve tokluk değerlerini elde etmek için, yüksek performanslı karma lif içeren çimento esaslı kompozit elemanlar üretilmiştir. Ayrıca karma lif ilavesinin, kompozit eleman dayanımında oluşturduğu mekanik değişim incelenmiştir [5]. Avar (2006) çalışmasında; çelik liflerin kanca uçlu olan veya olmayan olarak üç farklı türünün eleman dayanımına olan etkisini incelemiştir [6]. Bir başka çalışmada, kare geometriye sahip dik katmanlı plak elemanları elyaf ile takviye edilmiş, elemanda oluşan serbest titreşim değerleri incelenmiştir. Ayrıca farklı uzunluktaki elyaf takviyesinin eleman davranışı üzerine olan etkileri de araştırılmıştır. Analiz sonuçları, elyaf malzemesinin mekanik özelliklerinin plak elemanın davranışı üzerine etkili olduğu görülmüştür [7]. Eren (2016); fiber malzeme kullanılarak üretilmiş kumaşların son yıllarda inşaat mühendisliği alanındaki kullanımını alanlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda, uygulamada karşılaşılan sorunlar incelenmiş ve çözüm yöntemleri ilgili alternatifler sunulmuştur [8]. Ağcakoca (2020) tarafından aramid içerikli lif ile güçlendirilmiş çelik elemanların darbe yükü etkisi altındaki davranışı incelenmiş, inşaat sektöründe lifli malzeme ile güçlendirilmiş elemanların faydaları üzerinde durulmuştur [9]. Hüsem (2013); çelik ve polipropilen içerikli lif katkısı kullanarak düşük ve yüksek dayanıma sahip beton olarak üretilmiş kompozit elemanların basınç ve çekme dayanımlarını araştırmış, zarar görmüş beton numunelerde oluşan kırılma ve çatlak değişimleri incelemiştir [10]. Lif takviye edilerek üretilmiş polimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Özşahin (2015) tarafından irdelenmiş, ayrıca lif takviye edilerek üretilmiş polimerlerin betonarme elemanlarda donatı elemanı olarak kullanımını incelemiştir [11]. Çelik (2014); silindirik geometriye sahip beton numuneleri lif içerikli karbon elyaf malzemesi ile sararak güçlendirmiş, tekrarlı eksenel basınç kuvveti uygulanmış ve karbon elyaf sarma sayısının numunenin basınç dayanımına etkisini

incelemiştir [12]. Taşdemir (2012); yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda yutulmuş bağıl enerjinin düşük olmasından hareketle, yüksek dayanımlı betonlara kısa kesilmiş çelik teller ekleyerek, elemanın sünek davranışa sahip olması üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır [13]. Kim 2015 yılında yaptığı çalışmada; demet tipi poliamid fiber ve çengel uçlu fiber takviyesi ile üretilen beton numunelerde, yüksek hızlı çarpma yükü etkisi ile gerçekleşen kırılma davranışları, penetrasyon derinliği, oluşan krater çapı açısından incelemeler yapmış ve demet tipi poliamid fiberlerin bağlanma mukavemetini ve eğilme özelliklerini çengel uçlu çelik fiberleriyle karşılaştırmıştır. Demet tipi poliamid fiberlerin, artan interfiber boşluk ve bağlanma için fiber çekmesi olmadan kırılmaya maruz kaldığını, ancak çengel uçlu çelik fiberlere kıyasla daha düşük spesifik yüzey alanı nedeniyle eğilme mukavemeti ve kırılma enerjisi ile daha zayıf eğilme kırığı davranışı sergilediğini tespit etmiştir [14]. 2019 yılında yaptığı çalışmada ise demet tipi poliamid elyaf takviyeli çimentolu kompozit ve çengel çelik elyaf takviyeli çimentolu kompozitin sıkıştırma ve çekme davranışları üzerindeki gerilme oranı etkisini değerlendirmiştir. Sonuçlar; şekil değiştirme hızı, kırılma davranışı, mekanik bağlanma kuvvetindeki değişimler açısından irdelenmiştir [15]. Yıldızel (2020) çalışmasında, cam elyaf ile güçlendirilmiş endüstriyel beton ve duvarların üretilmelerine yardımcı olmak için genel tasarım optimizasyonu yapmıştır. Agregata metakaolin (MK) ve GF içerikleri olarak kullanılan macun ve silis kumu dahil olmak üzere bileşenlerin basınç ve eğilme mukavemetleri açısından etkilerini incelenmiştir. İşlenebilirlik gibi taze beton özellikleri lif içeriği testleri ile araştırılmıştır. Optimum içerik muhtevası ve bunların beton performansı ile ilişkileri Taguchi, ANOVA ve ekstrem vertices tasarım yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla belirlenmiştir [16]. Silindirik geometriye sahip siloların fiber içerikli şerit kullanılarak, burkulma [17] ve hidrostatik basınç [18] etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Yapı elemanlarına imalat aşamasında fiber ilave edilerek dayanımı artırılabilir gibi, kolon giriş birleşim yerlerinde farklı bağlantı elemanları kullanarak dayanımda artış sağlanmaktadır [19], bu bağlantılar yapının modal parametrelerinde farklılıklar yaratmaktadır [20].


III. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneyel çalışmada, beton malzemesine fiber ilave edilerek elde edilen kompozit elemanın basınç etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Kompozit eleman oluşturulurken fiber donatı kullanılmıştır. Fiber malzeme Poliamid 6.6 hammaddesinden EN 14889-2 [21] Sınıf 1 ve ASTM C 1116 [22] standartlarına göre üretilen, sentetik malzeme olup, beton içerisinde üç boyutlu homojen dağılım sağlayan, servis ve tasarım yükleri altında taşıma kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca çalışmada kullanılan fiber, eleman içinde sağladığı homojen dağılım sayesinde, eleman oluşacak çatlakların kontrolünü de yapmaktadır. Makro Fiber diğer sentetik liflerden farklı olarak %5 oranına kadar nemi bünyesine alabilme kabiliyetine sahiptir. Fiberin nem tutma özelliğinden dolayı, özellikle taze beton aşamasında nemi tutmaktadır [23].

Beton prizini almaya başladığında fiber malzeme; elemanın hidrasyonu için gerekli olan nemi geri vererek, elamanda içten kürlenme etkisi yapmaktadır. Böylece, elemanda ısı ve rötreten dolayı oluşan çatlakların oluşumu minimize ederek yapısal bütünlük sağlamaktadır [23]. Fiber malzeme oranı, gereksinimlerine bağlı olarak, genellikle 2-10 kg/m³ aralığında değişmektedir. Sentetik fiber malzemesine ait mekanik özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo1. Fiber donatı teknik özellikleri [23]

Fiber	Karakteristik Özellikler
Ham madde	Mod. Ed. Poliamid 6.6
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1.14
Uzunluk (mm)	54
Çap (mm)	0.55
Çekme gerilmesi (MPa)	900
Alkali direnci	Çok iyi
Korozyon Direnci	Çok iyi
Erime sıcaklığı [°C]	260
Fiber adedi / kg	88200



Kullanılan fiber malzemenin ana ham maddesini oluşturan Poliamid 6.6, yüksek sertlik derecesine sahip ve mukavemeti yüksek bir malzeme olup, ısı etkisi ile oluşacak deformasyonlara karşı da dirençlidir. Ayrıca çok yüksek eğilme ve çekme dayanımına sahip, tekrarlı gerilme-şekildeğiştirme ve ani darbe yüklerine karşı yüksek dirence sahip, her tür yük altında çalışmaya uygun, düşük sürtünme katsayısına sahip plastik esaslı bir malzemedir. Sentetik fiber özellikle mukavemet, sertlik ve yorulma direnci gibi mekanik özelliklerini güçlendirmek amacıyla elastomer ve cam elyafla takviye edilmektedir.

Çalışmada fiber değişiminin beton basınç dayanımına etkisini araştırmak amacıyla, öncelikle aynı şartlar altında hazırlanmış dört farklı beton sınıfından lif katkısız, 2 kg/m³ (%0.08) ve 8 kg/m³(0.32) oranında lif katkılı silindirik numuneler hazırlanmıştır. Kalıplar d=100mm ve h=200mm boyutunda olup, standartlarda belirtilen h/d=2 oranını karşılamaktadır. Deneysel çalışmada, C20, C25, C30, C35 dört farklı dayanıma sahip beton numuneler hazırlanarak basınç deneyleri yapılmış, sonuçlar sonlu eleman modelindeki deformasyon değişimi ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan beton malzemeleri karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir. Karışımdaki su oranı yaklaşık bir oran olup kumun su içeriğine göre değişmektedir. Kum ve agrega granülometrisi Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 2. Beton karışım oranları

Ağırlıkça Oran (%)	Çimento	Kum	Agrega	Su
	15	35	40	10

Tablo 3. Agrega ve kum granülometrisi

Agrega		Kum	
Elek Büyüklüğü (mm)	Kümülatif Kalan (%)	Elek Büyüklüğü (mm)	Kümülatif Kalan (%)
20	0	4	0
16	13	2	8
12.5	22	1	28
10	62	0.5	52
4.75	73	0.25	80
4	100	0,063	100

IV. DENEYSEL ÇALIŞMA

Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarlarında 12 adet 100mmx200 mm ebatlarında silindirik şekilde lif katkısız ve farklı oranda lif katkılı numuneler hazırlanmış; priz hızlandırıcı, akışkanlaştırıcı vb. katkı maddeleri kullanılmamıştır. Silindirik deney numuneleri TS EN 12350-1 [24], TS EN 12390-1 [25], TS EN 12390- 2 [26], TS EN 12390- 3 [27] ve TS EN 12390-4 [28] standartlarına uygun olarak laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında deney numunelerinden 3 seri hazırlanmış, farklı zaman aralıklarında eksenel basınç deneyine maruz bırakılmıştır.

Dayanım testi bilgisayar kontrollü, hidrolik yüklemeli, TS EN ISO 6892-1 [29] uygun, malzeme test yazılımlı, 300 ton kapasiteli, ±1%mm ±0.2%mm deplasman ölçüm hassasiyetli, 250mm’lik hidrolik piston stroğuna sahip, 1/300000 kuvvet ölçüm rezilasyonlu hidrolik universal test cihazı ile yapılmıştır [30] (Şekil 1a).

Test cihazı, her deney öncesinde temizlenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece, hidrolik test cihazından numuneye etki edebilecek olan eksantrik yüklenme engellenmiştir.

Dökümden bir gün sonra kalıptan çıkarılan ve 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilerek priz alması sağlanan lif katkılı ve katkısız silindirik beton numuneler, basınç yüklemesi altında incelenmeden önce, kürden çıkarılıp bir gün kurumaya bırakılmıştır. Basınç yükünün beton numunelere üniform olarak dağılımını sağlamak

























için %70 sarı kükürt ve %30 grafit tozunun 300 °C de eritilmesi ile elde edilen eriyik yardımıyla pürüzsüz bir yüzey oluşturarak numunelerin yük verecek yüzeylerine kükürt başlıklar yapılmıştır (Şekil 1b, Şekil 1c). Lif katkısız ve farklı oranda lif ilave edilerek hazırlanan numunelere, yükleme hızı, dakikada 4mm olacak şekilde basınç yüklemesi uygulanmıştır [2]. Numunelerin deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri Şekil 2’de verilmektedir. Buna göre kırılma türleri literatürdeki Feng Shi ve arkadaşları tarafından [31] yapılan çalışmada gözlenmiş olan kırılma şekilleri ile uyumludur. Basınç etkisi altında fiber donatı takviyeli betonlar öngörülen kırılma davranışları sergilemişlerdir.



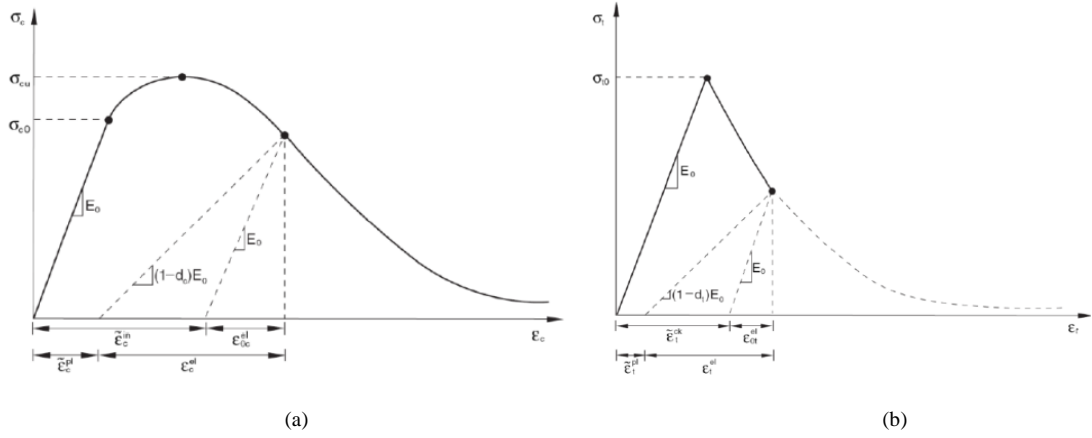
Şekil 1. (a) hidrolik test cihazı, (b) Numune kalıpları, (c) kükürt kazanı

V. SONLU ELEMAN MODELİ

Kompozit elemanın basınç etkisi altındaki davranışını incelemek amacıyla, sonlu eleman yazılımı Abaqus/Standart kullanılarak, deneysel çalışmadaki numuneleri yansıtan üç boyutlu sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Modellemede, doğru malzeme modelinin seçilmesine yönelik olarak ABAQUS sonlu eleman kütüphanesinde tanımlı olan, basınç yüklemesi altında deney numunesinde oluşan ezilme ve çatlak davranışını en ideal şekilde yansıtan, Beton Plastikleşme Hasar Modeli (Concrete Damage Plasticity Model-CDP) kullanılmıştır [32,33]. CDP malzeme modeli fiber ile güçlendirilmiş beton elemanların modellemesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [34,35]. Doğrusal olmayan analizlerde, CDP malzeme modelindeki ezilme durumunu tanımlamak için, elemanın aksenal basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır (Şekil 3).

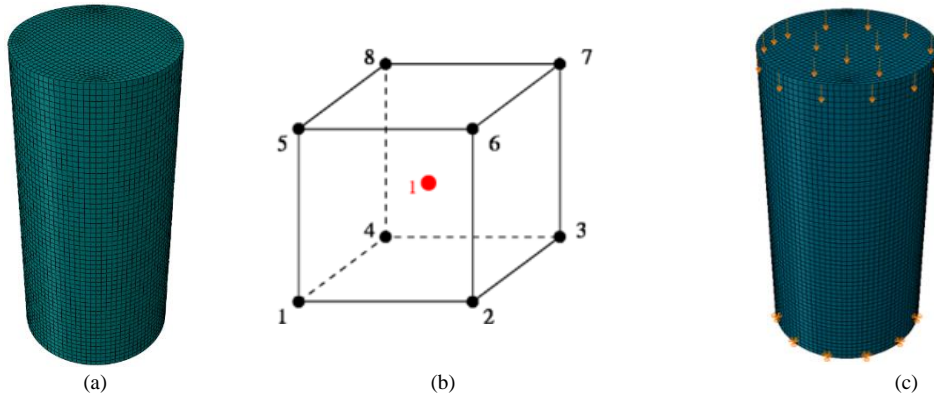
Beton Sınıfı	Fiber Katkısız		Fiber Katkılı %0.08		Fiber Katkılı %0.32	
	Deney Öncesi	Deney Sonrası	Deney Öncesi	Deney Sonrası	Deney Öncesi	Deney Sonrası
C20						
C25						
C30						
C35						

Şekil 2. Beton numunelerin deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri



Şekil 3. Betonun (a) aksenal basınç ve (b) çekme altında CDP modeline gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin tanımlanması [33,34]

Sonlu eleman parçacık modeli olarak, ABAQUS kütüphanesinden, üç boyutlu sürekli katı ve sekiz düğüm noktalı C3D8R eleman tipi seçilmiştir. Bu eleman düğüm noktaları köşelerinde olan elemanlar olup her yönde doğrusal enterpolasyon kullanır ve genellikle doğrusal elemanlar veya birinci dereceden elemanlar olarak adlandırılır. C3D8R eleman tipi genellikle üç boyutlu katı cisimlerin çözümünde kullanılmaktadır. Ayrıca söz konusu elemanın CDP malzeme modeline uygun olarak çatlak ve hasar oluşumunu simüle eden en uygun elemanlardan biridir. Analiz sırasında kullanılan zamanı minimize etmek için, yine ABAQUS kütüphanesinden azaltılmış integrasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, seçilen sonlu eleman parçacık modelinde düğüm noktası sayısının fazla olması durumunda, düğüm noktası sayısının parçacık orta noktasında tek noktaya indirgenerek, çok düğüm noktalı parçacık analiz sonuçları ile yaklaşık eşit sonuç vermektedir. Sonlu eleman model, 55693 düğüm noktası ve 51840 sonlu elemandan oluşmaktadır. Oluşturulan modelin sonlu eleman ağ sıklığı (mesh) Şekil 4 (a), sınır şartları ve yükleme durumu Şekil 4 (b) ve eleman tipi Şekil 4 (c)'de verilmiştir.



Şekil 4. (a) CTP malzeme modeli, (b) C3D8R eleman tipi, (c) sınır şartları

VI. BULGU VE TARTIŞMA

A. Sonuçlar ve Tartışma

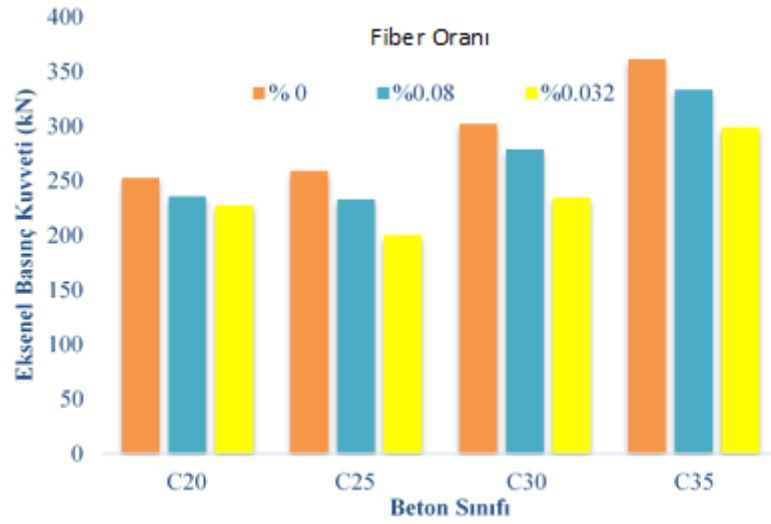
Çalışma kapsamında hazırlanan numuneler tek doğrultuda basınç deneyine tabi tutularak lif katkısız ve farklı oranda lif katkılı 12 adet olacak şekilde hazırlanmıştır. Deney sonucu elde edilen gerilme ve aksenal kuvvet değerleri ile aksenal yük taşıma kapasitelerindeki değişim oranları Tablo 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Tablo 4'den görüleceği üzere, deneyler sonucunda lif katkısız C20, C25, C30 ve C35 beton sınıfı deney numuneleri beklenen

beton dayanımından daha yüksek dayanım sergilemiştir. Bu sonuçlar, üretici firma tarafından standartlara uygun hatta standartların üstünde bir kaliteye sahip beton üretildiğinin göstergesi olarak belirtilebilir.

Deney numunelerindeki lif katkı oranı 2kg/m^3 olarak ayarlanan numunelerin basınç dayanımı incelendiğinde, beton basınç dayanımlarının lif katılmamış numune dayanımlarından %7 ile %10 aralığında değişen değerlerde düşüş olduğu gözlenmiştir. Beton yük taşıma kapasitesindeki düşüş oranı, ortalama bir değere dönüştürülürse, dayanımdaki düşüşün fibersiz betonun yük taşıma kapasitesine oranı yaklaşık %8 olduğu söylenebilir.

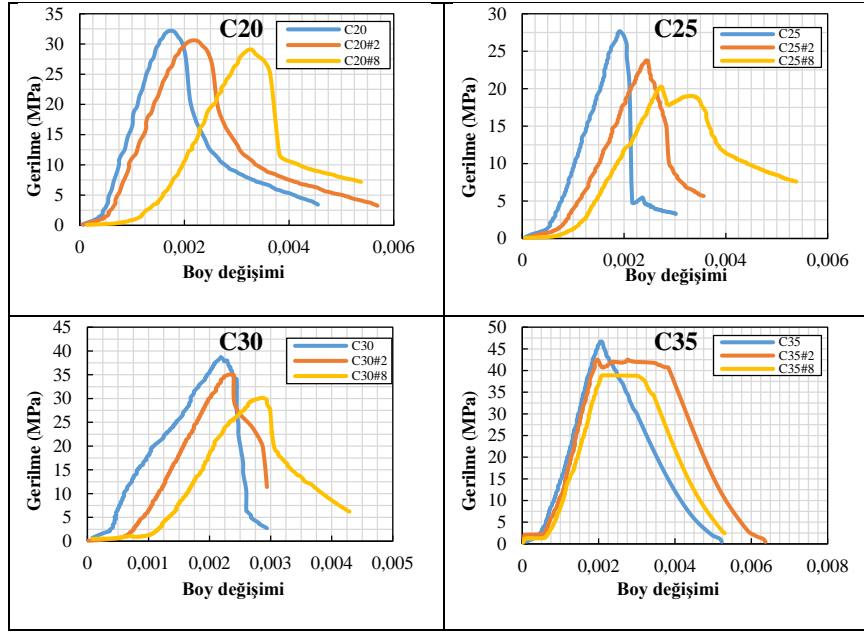
Tablo 4. Deney numunelerinin kuvvet ve gerilme değerleri

Beton Sınıfı	Fiber Oranı (Ağırlıkça %)	Numune Kodu	Kuvvet (kN)	Gerilme (MPa)	Eksenel Yük Taşıma Kapasitesindeki Azalma (%)
C20	0	C20	252.7	32.2	0
	0.08	C20#2	235.6	30.0	7
	0.32	C20#8	227.8	29.0	10
C25	0	C25	259.2	33.0	0
	0.08	C25#2	233.3	29.7	10
	0.32	C25#8	200.3	25.9	22
C30	0	C30	302.4	38.5	0
	0.08	C30#2	278.8	35.5	8
	0.32	C30#8	234.8	29.9	22
C35	0	C35	361.3	46.0	0
	0.08	C25#2	333.8	42.5	8
	0.32	C35#8	299.2	38.1	17



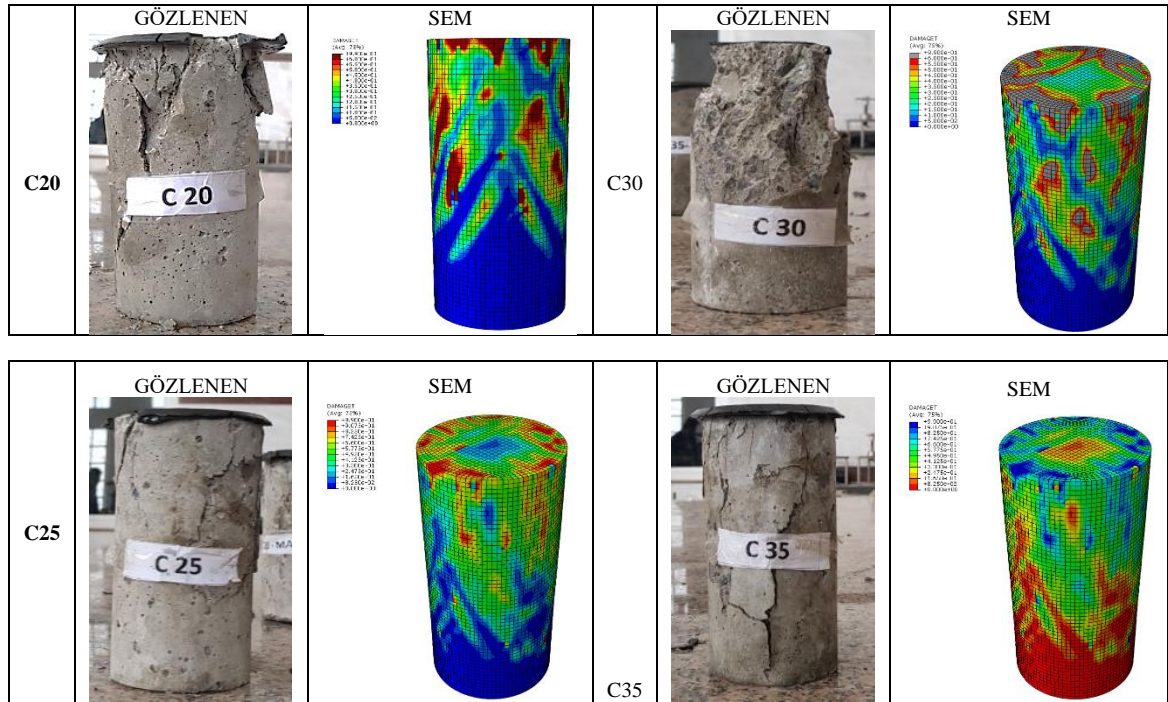
Şekil 5. Fiber oranının beton basınç dayanımı üzerine etkisi

Çalışmada kullanılan her beton sınıfı için lif katkısız, ağırlıkça %0.08 ve %0.32 oranında lif katkılı olarak üretilen silindirik numunelerin tek eksenli basınç deneyi sonucu elde edilen gerilme-boy değişim oranı grafikleri Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Gerilme-boy değişim ilişkisi

Deney sonucu elde edilen gerilme-boy değişimi ile, C3D8R eleman tipi ve CDP malzeme modeli kullanılarak sonlu eleman modeli tanımlanmış ve analiz sonucu elde edilen kırılma ve çatlama şekilleri deneysel çalışma sonunda silindirik beton numunelerinde gözlenen kırılma ve çatlama şekilleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Numunelerin deneysel sonucu ile sonlu eleman hasar durumunun karşılaştırılması

Numunelerin deney sonrası kırık-çatlak hasarı görüntüleri ile sonlu eleman model analizinden elde edilen hasar durumu görüntüleri Şekil 7’de karşılaştırılmıştır. Numunelerin gerek deneysel gerekse sonlu eleman analiz sonucu elde edilen sergiledikleri hasar davranışı büyük oranda benzerlik göstermektedir. Bu durum sonlu eleman analizinde kullanılan eleman tipi ve malzeme modeli tercihini doğrulamaktadır.

VII. SONUÇ ve ÖNERİLER

Farklı dayanıma sahip beton numunelere, farklı oranda fiber ilave edilmesinin, beton basınç dayanımına etkileri deneysel olarak incelenmiş ve Abaqus/Standart yazılımı ile oluşturulan matematik modelinin sonlu eleman analizi sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Farklı beton sınıflarına farklı oranda fiber donatı takviyesi ilave edilerek oluşturulmuş numuneler basınç yüklemesi altında incelendiğinde, fiber donatı takviyeli kompozit malzemeler ile ilgili olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Deney numunelerinin grafikleri incelendiğinde, fiber takviyesinin şekil değiştirme kapasitesine katkı sağladığı görülmüştür. Dört farklı beton sınıfının deneysel grafikleri incelendiğinde, numunelerin maksimum eksenel yük kapasitesine ulaştıktan sonra dahi, beton etkin şekil değiştirme kapasitesi ile enerji sönmlemeye devam ettiği görülmüştür. Beton dayanımındaki değişimin, şekil değiştirme davranışına etkileri irdelenecek olunursa, özellikle C35 beton sınıfındaki fiber katkılı her iki numunenin maksimum basınç dayanımında bir sahanlık bölgesine sahip olması, fiber donatının yüksek dayanımlı beton ile beraber uyumlu çalıştığı bir göstergesi olarak belirtilebilir.

Deney sonunda numuneler incelendiğinde, fiber ilave edilmeyen dört farklı beton numunesi maksimum basınç dayanımına eriştikten sonra bünyesinde oluşan deformasyonların gözle görülebilir düzeydedir. Buna karşın, her dört beton sınıfı için üretilmiş fiber katkılı beton numuneleri, maksimum basınç dayanımına eriştikten sonra dahi bünyelerinde gözle görülebilir çatlak ve kırık hasarları gözlenmemiştir. Özellikle aynı beton sınıfına ait fiberli ve fibersiz numunelerin gerilme-boy değişimi incelendiğinde, fiber katkılı elemanların daha sünek davrandığı, ayrıca fibersiz numune ile kıyaslandığında çatlama, dağılma ve dökülmenin baskın şekilde olduğu görülmüştür. Sentetik fiber donatının yük altında oluşan yapısal çatlaklara karşı etkili bir çözüm sunduğu ve etkin çatlak kontrolünü her noktada sağladığı gözlenmiştir.

İncelenen tüm beton sınıflarında fiber oranı ağırlıkça %0.08’den %0.32’ye çıkarıldığında, beton basınç dayanımının düştüğü görülmüştür. Lif katkı oranı ağırlıkça %0.08 olarak ayarlanan numunelerin basınç dayanımı incelendiğinde, beton basınç dayanımlarının lif katılmamış numune dayanımlarına oranla ortalama %8 azaldığı söylenebilir. Lif katkı oranı ağırlıkça %0.32 olarak ayarlanan numuneler de benzer durum gözlemlenmekle birlikte dayanımdaki bu düşüş oranının daha da artarak ortalama %18’e yükseldiği gözlenmektedir. Sonuç olarak fiber miktarının artmasının belli bir orandan sonra beton basınç dayanımını düşürdüğü görülmektedir.

Fiber malzemesinin uygulanmasında; beton hazırlandıktan sonra minimum 5 dk trans-mikserin son hızında karıştırılması gerekmektedir. Ancak yapılan deneysel çalışma kapsamında mevcut laboratuvar olanakları çerçevesinde, hazırlanan betonun içine konulan fiber elle karıştırılarak deney numuneleri oluşturulmuştur. Farklı dayanımda hazırlanmış numunelerin eksenel basınç kuvvetine tabi tutulmaları sonucu, dayanım değerlerinin beklenenden fazla olmasının bu duruma bağlı olabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Akman, M. S. (2003). Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi. *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 426 - 2003/4*
- [2] Ağcakoca, E., & Yaman, Z. (2018). Effect On Pressure Resistance Of Minimum Ratio Fiber Supply In Concrete Numbers. *In 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Sakarya University Culture and Congress Center, Sakarya-Turkey.*
- [3] Yenidünya, E. (2013). *Farklı maksimum sıcaklık değerleri altında buhar kürü uygulamasının çelik lifli betonların mekanik dayanımına etkisi*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

- [4] Yıldız, S., & Ulucan, Z. (2008). Beton Borularda Cam Lif Katkısının Tepe Yük Dayanımına Etkisinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23:2.
- [5] Çelikten, S. (2014). *Çelik Fiber İçeren Dayanımlı Beton Özellikleri Üzerine Metakaolin ve Öğütülmüş Pomzanın Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- [6] Avar, D. (2006). *Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi*, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Eruslu, S.Ö. (2008). *Kısa Elyaf Takviyeli Kompozit Plaklarda Titreşim Analizi*, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [8] Eren, A., & Soyarslan, D. (2016). Tekstil Malzemelerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamaları, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(Özel 1), 29-34.
- [9] Agcakoca, E., & Biyiklioglu, E. (2020). Experimentally and Numerically Investigating the Performances of Aramid Fiber-Reinforced Steel Beams Under Impact Loadings. *Arabian Journal For Science And Engineering*.
- [10] Hüsem, M., & Demir, S. (2013). Çelik ve Polipropilen Liflerin Geleneksel ve Yüksek Performanslı Betonlarda Kirilma ve Çatlak Gelişimine Etkisi. *Engineering Sciences*, 8:4, 182-193.
- [11] Özşahin, B., Mülayim, B., ve Arkoç, O. (2015). Betonarme Yapı Elemanlarında Lif Takviyeli Polimerlerin Kullanımı. *9. Uluslararası Sinan Sempozyumu*, 21-22 Nisan, Türkiye, 109-115.
- [12] Çelik, K.V., & Karaşin, H. (2014). Karbon elyaf ile betonun güçlendirilmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 5(1), 1-11.
- [13] Taşdemir, M., Bayramov, F. (2012). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin meri kanik davranışı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, Aralık Cilt 1; Sayı 2, Sayfa 125-144.
- [14] Kim, H., Kim, G., Gucunski, N., Nam, J., & Jeon, J. (2015). Assessment of flexural toughness and impact resistance of bundle-type polyamide fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 78, 431-446.
- [15] Kim, H., Kim, G., Lee, S., Son, M., Choe, G., & Nam, J. (2019). Strain rate effects on the compressive and tensile behavior of bundle-type polyamide fiber-reinforced cementitious composites. *Composites Part B: Engineering*, 160, 50-65.
- [16] Yıldız, S. A., Tayeh, B. A., & Calis, G. (2020). Experimental and modelling study of mixture design optimisation of glass fibre-reinforced concrete with combined utilisation of Taguchi and Extreme Vertices Design Techniques. *Journal of Materials Research and Technology*.
- [17] Aydın, A. C., Yaman, Z., Ağcakoca, E., Kılıç, M., Maali, M., & Dizaji, A. A. (2019). CFRP Effect on the Buckling Behavior of Dented Cylindrical Shells. *International Journal of Steel Structures*, 1-11.
- [18] Maali, M., Kılıç, M., Yaman, Z., Ağcakoca, E., & Aydın, A. C. (2019). Buckling and post-buckling behavior of various dented cylindrical shells using CFRP strips subjected to uniform external pressure: comparison of theoretical and experimental data. *Thin-Walled Structures*, 137, 29-39.
- [19] Nasery, M. M., Hüsem, M., Okur, F. Y., & Altunişik, A. C. (2020). Damage effect on experimental modal parameters of haunch strengthened concrete-encased composite column-beam connections. *International Journal of Damage Mechanics*, 29(2), 297-334

- [20] Hüsem, M., Nasery, M. M., Okur, F. Y., & Altunişik, A. C. (2018). Experimental evaluation of damage effect on dynamic characteristics of concrete encased composite column-beam connections. *Engineering Failure Analysis*, 91, 129-150.
- [21] EN, B. 14889-2, (2006). *Fibres for concrete-Part, 2*.
- [22] ASTM C1116/C1116M-10a (2015). *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete*
- [23] <http://www.kordsa.com/kratos/assets/kratosbrosurtr.pdf>/ 14:00 / (15.02.2018)
- [24] TS EN 12350-1, (2019), *Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 1: Numune alma ve yaygın kullanılan aygıtlar*.
- [25] TS EN 12390-1, (2014), *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri*.
- [26] TS EN 12390-2, (2019), *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması*.
- [27] TS EN 12390-3, (2019), *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin*.
- [28] TS EN 12390-4, (2019), *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4: Basınç dayanımı - Deney makinelerinin özellikleri*.
- [29] TS EN ISO 6892-1, (2020). *Metalik malzemeler - Çekme deneyi - Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney yöntemi*
- [30] <http://www.alsalab.com/hidrolik-universal-test-cihaz-utm3000.html> / 13:00 / (15.02.2020)
- [31] Feng S., Thong ,M. P., Hong, H., Yifei ,H., (2020). Post-cracking behaviour of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths, *Construction and Building Materials*, Volume 26230 November 2020 Article 120108
- [32] George, J., Rama, J.K., Kumar, MS., & Vasan, A. (2017). Behavior of Plain Concrete Beam subjected to Three Point Bending using Concrete Damaged Plasticity (CDP) Model. *Materials Today Proceedings*, 4:9, 9742-9746.
- [33] Wu, WLJ.,(2017). A note on the ABAQUS Concrete Damaged Plasticity (CDP) model. In *Civil, Architecture and Environmental Engineering* (pp. 1301-1306). CRC Press.
- [34] ABAQUS, *Abaqus Manuals. version 2018*. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2018.

Araştırma Makalesi – Research Article

TiO₂ Katkılı Çevre Dostu Dielektrik Sıvının Elektro Erozyon Delik Delme Performanslarının Araştırılması

Oğuz Erdem^{1*}, Süleyman Kılıç²

Geliş / Received: 02/04/2020

Revize / Revised: 25/06/2020

Kabul / Accepted: 29/06/2020

ÖZ

Bu çalışmada iş parçası olarak AISI4140 çeliği, elektrot olarak 2 mm dış çapa sahip ortası tek delik bakır tüp, dielektrik sıvı olarak ise yüksek parlama noktasına ve düşük viskoziteye sahip Euroclub EDM ER100 çevreci tip elektro erozyon sıvısı kullanılmıştır. ER100 içerisine farklı derişim oranlarında (katkısız, 5 g/l ve 10 g/l) katılan TiO₂ tozunun hassas (M1), orta (M2) ve kaba (M3) işleme koşullarında elektro erozyon ile işleme (EEİ) çıktı performansları (iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), bağıl aşınma (BA) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerine etkileri araştırılmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde İİH değeri açısından ortalama %30,48'lik bir artış elde edilmiştir. Yine, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %57,03'lük bir işleme hızı artışı sağlanmıştır. Elektrotu döndürmek İİH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %99,5 artış sağlarken, M2 işleme tipinde ortalama %13,75 ve M3 işleme tipinde ortalama %9,38 oranlarında artışlara olanak sağlamıştır. TiO₂ tozu katkısıyla hem sabit hem de döner elektrotla yapılan deneylerde, M1 ve M2 işleme tiplerinde elektrot aşınması azalırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte elektrot aşınmasının arttığı sonucuna varılmıştır. BA değerlerinin tıpkı EAH değerleri gibi özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %5,27, M2 için %8 ve M3 için %2,95 oranlarında azaltmıştır. Yine, 10 g/l TiO₂ tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %8,15, M2 için %15,07 ve M3 için %6,21 oranlarında azalttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Elektro Erozyon Delik Delme, Çevre Dostu Dielektrik Sıvı, TiO₂

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: oguz.erdem@ahievran.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8094-3222>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Bağbaşı Mah. Sahir Kurutluoğlu Cad. No:100 Kırşehir

²İletişim: suleymankilic@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-1681-9403>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Bağbaşı Mah. Sahir Kurutluoğlu Cad. No:100 Kırşehir

Investigation of Electrical Discharge Drilling Performances of TiO₂ Mixed Eco-friendly Dielectric Liquid

ABSTRACT

In this study, AISI4140 steel was used as a workpiece, a single hole copper tube with an outer diameter of 2 mm as the electrode, and Eurolub EDM ER100 environmentally friendly type erosion fluid with a high flash point and low viscosity as a dielectric liquid. The effects of TiO₂ powder, which was added to ER100 at different concentration rates (no added, 5 g/l and 10 g/l), on electrical discharge machining (EDM) output performances (workpiece removal rate (WRR), electrode wear rate (EWR), relative wear (RW) and average surface roughness (R_a)) under sensitive (M1), medium (M2) and rough (M3) machining conditions were investigated. By the agency of 5 g/l TiO₂ powder addition into the dielectric liquid, an average increase of 30.48% was achieved in terms of WRR in all three machining types. Again, with a 10 g/l TiO₂ powder addition into the dielectric liquid, an average machining rate increase of 57.03% was achieved for all three machining types. Rotating the electrode redundant provided an average of 99.5% increase for M1 machining type on WRR values, while an average of 13.75% increase in M2 machining type and an average of 9.38% increase in M3 machining type. In experiments with both fixed and rotary electrodes with TiO₂ powder addition, it has been concluded that electrode wear decreases for M1 and M2 machining types while only for M3 machining type with 10 gram TiO₂ powder added dielectric, electrode wear increases. It was determined that RW values exhibit features just like EWR values. The 5 g/l TiO₂ powder addition into the dielectric fluid had reduced R_a values by 5.27% for M1, 8% for M2 and 2.95% for M3. Also, 10 g/l TiO₂ powder addition was found to reduce R_a values by 8.15% for M1, 15.07% for M2 and 6.21% for M3.

Keywords- *Electrical Discharge Drilling, Eco-Friendly Dielectric Liquid, TiO₂*

I. GİRİŞ

İnsanlar tarafından elektriksel boşalmaların (kıvılcım) aşındırıcı etkisi 1770'lerden beri bilinmektedir [1]. 1943 yılında, bilim adamı Lazarenko tarafından geliştirilen kontrol devresiyle ilk olarak dalma elektro erozyon tezgahının temelleri atılmıştır [2]. Elektro erozyon ile işleme (EEİ) yönteminde, yalıtkan bir dielektrik ortam içerisinde birbiriyle temas etmeyen elektrot ve işparçasına uygulanan elektrik akımının oluşturduğu elektriksel kıvılcımlar sayesinde işleme gerçekleşir [3]. Kıvılcımın oluşturduğu plazma kanalındaki elektron bombardımanı sayesinde işparçası yüzeyinde bulunan belirli bir alanın sıcaklığının artması sonucunda ergime ve buharlaşma gerçekleşir ve böylece o bölgedeki malzeme/talaş kaldırılır [4]. EEİ, termal bir proses olduğu için işparçasının sertlik değerinin işlenebilirlik açısından hiçbir önemi yoktur [5]. Yöntem başlangıçta sadece iletken malzemelerin işlenmesi için tercih edilse de [6], günümüzde geliştirilen yardımcı iletken elektrot metodu ile artık yalıtkan seramikleri bile işlemek mümkün olabilmektedir [7]. SiC [6] ve ZTA-TiC gibi seramiklerin [8] yanı sıra, karbon fiber takviyeli plastikler [9] de artık EEİ yöntemiyle işlenebilmektedir. EEİ yöntemi; dalma elektro erozyon [10], elektro erozyon ile delik delme [11], tel elektro erozyon [12], mikro tel elektro erozyon [13], toz katkılı dielektrikle EEİ [14], mikro-EEİ [15], kuru EEİ [16, 17], kuruya yakın EEİ [18, 19] ve üç faz içeren (katı-sıvı-gaz) dielektrikle EEİ [20] olarak sınıflandırılabilir. Geliştirilmiş bu EEİ teknikleriyle, günümüzün kalıpcılık sanayinde, savunma sanayinde, uçak ve uzay sanayinde, elektronik sanayinde, tıp ve biomedikal sektörlerinde ihtiyaç duyulan yüksek kaliteli parçaların imalatları mümkün olmaktadır [21, 22].

Düşük işparçası işleme hızı (İİH) ve yüksek elektrot aşınma hızı (EAH) neticesinde yüksek bağlı aşınma (BA) değerleri, işlenmiş yüzeylerde yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ve mikro çatlaklar içeren tekrardan katılmış katmanlar, EEİ yönteminin dezavantajları olarak özetlenebilir [23]. Bu gibi handikapların üstesinden gelebilmek için her geçen gün yeni çözümler EEİ yöntemine dahil edilmektedir [24]. Bunlar: dielektrik sıvıya toz katkısı [25], dielektrik sıvıya ısıtma [26], farklı tipte dielektrik sıvı kullanımı [27], dielektrik sıvı içerisine aşındırıcı madde katkısı [28], döner elektrot kullanımı [29], farklı tipte elektrot kullanımı [30] ve işleme bölgesinde manyetik alan oluşturma [31] olarak örneklendirilebilir. Literatürdeki birçok çalışmada toz katkılı EEİ (TKEEİ) metodunun kullanılmasıyla; İİH'nin arttığı [32], toz parçaların boşalım enerjisini dağıtarak verimliliği artırdığı [33] ve geleneksel EEİ ile işlenmiş parçalara nazaran daha üstün yüzey özelliklerinin sergilendiği [34] rapor edilmiştir. TKEEİ üzerine yapılmış araştırmaların çoğu Al [25, 29], Cu [33], Al_2O_3 [5], B_4C [28], grafit [10, 26], SiC [32], TiO_2 [35] gibi tozları kapsarken, son zamanlarda nano boyutta karbon nanotüp [24] ve grafit oksit pulları [36] gibi farklı formlardaki katkılarda dielektrik sıvılara yapılmaktadır.

TKEEİ üzerine literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin; Wang ve arkadaşlarının çalışmasında, EEİ yağına 10 g/l Al tozu katkısı, Inconel 706 işparçalarının aynı işleme parametrelerinde İİH hızını 0,135 mm^3/min değerinden 0,283 mm^3/min değerine çıkardığı belirtilmiştir. Fakat, Al tozu katkısının EAH değerini farklı işleme koşullarında %6,25 ile %13,7 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Al tozu katkısının yüzey pürüzlülüğü değerlerini %25,9 oranında azalttığı da rapor edilmiştir [25]. Yine, Paul ve arkadaşlarının çalışmasında, dielektrik sıvı içerisine katılan 400 mesh boyutuna sahip Cu tozlarının, özellikle yüksek işleme parametrelerinde Inconel 718 işparçası yüzeyinde Ni_3Nb oluşumunu artırdığı ve bu sayede mikro çatlakları azaltarak işlenmiş yüzeylerde iyileşme sağladığı belirtilmiştir [33]. Kumar ve arkadaşlarının çalışmasında ise, Inconel 825 işparçasının işlenmesinde, dielektrik sıvıya iletken olmayan nano boyuttaki Al_2O_3 tozu katkısının, İİH değerini %57 oranında artırdığı ve işlenmiş yüzeyin R_a değerini 1,487 μm 'ye kadar düşürülebildiği belirtilmiştir. Çalışmada elde edilen bu yüzey pürüzlülüğü değerinin, toz katkısız dielektrikler kullanılarak işlenmiş işparçalarıyla karşılaştırıldığında %63 oranında bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir [5].

TiO_2 malzemesi kararlı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, korozyon direnci yüksek ve foto-katalitik etkilere sahip olduğu için genellikle antibakteriyel ve antiseptik uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, TiO_2 nano partiküllerinin mükemmel oksidasyon yetenekleri sayesinde organik kirleri ve bakterileri çürütebilme özellikleri mevcut olduğu için sağlık alanında sıkça kullanılmaktadır. Yine, TiO_2 malzemesinin bunlar haricinde birçok alanda farklı uygulamaları da mevcuttur [37]. TiO_2 malzemesinin EEİ alanındaki uygulamalarına bakıldığında; Baseri ve arkadaşları, H13 çeliği işparçaları ve 200 dev/min hızla dönen bakır elektrotlar kullanarak gaz yağı dielektrik içerisine 0-1-2-3 g/l oranlarında nano boyutta TiO_2 tozu katkısıyla 2,5-6-9 A boşalım akımı ve 35-50-100 μs vuruş süreleri değerleriyle deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, gaz yağı içerisine 1 g/l TiO_2 tozu katkısı, İİH değerlerini tüm işleme koşullarında

artırırken 1 g/l katkı oranından sonraki her TiO₂ tozu katkısı, işparçası ve elektrot arasında anormal boşalımını artırdığını tespit etmişlerdir. Bu sebepten, 1 g/l katkı oranından sonraki toz katkısı tüm işleme koşulları için İİH değerlerini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Artan toz konsantrasyonun EAH değerlerini düşürdüğünü de rapor etmişlerdir. Diğer bir taraftan, artan toz konsantrasyonun işleme bölgesinde talaş yığılmasına engel olarak işlenmiş yüzeylerde parlatma etkisi oluşturduğunu ifade etmişlerdir [35].

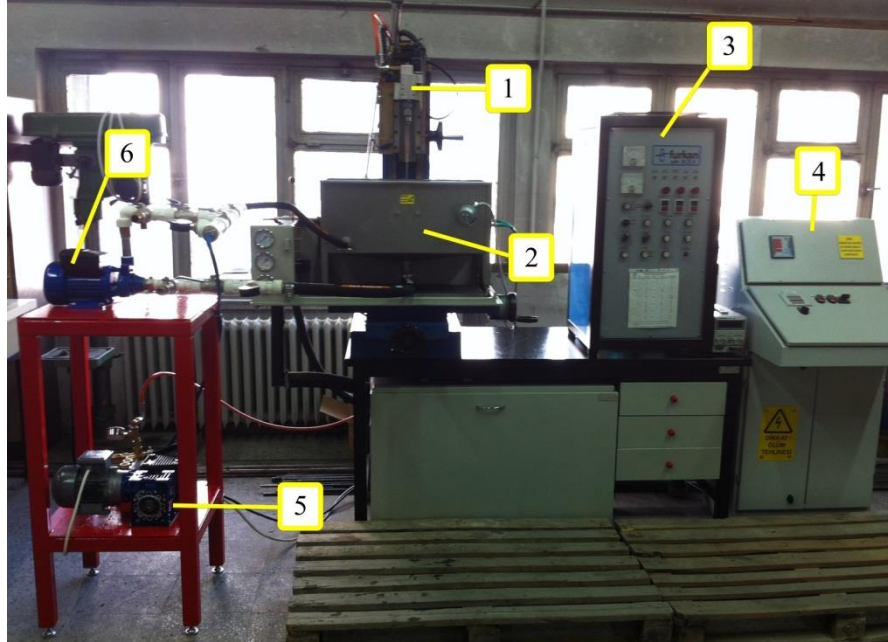
Dielektrikler, EEİ yönteminde kritik rol oynarlar. Dielektriklerin genellikle, işparçası ve elektrot arasındaki kıvılcımın gerçekleşmesine zemin hazırlama ve iyonizasyona olanak sağlama görevlerinin yanı sıra [38], işleme sonrası işparçasının soğumasına ve işleme artıklarının ortamdaki uzaklaştırılmasına katkıda bulunma görevleri de vardır [27]. EEİ’de kullanılan dielektrik ortamlar temelde üç kategoride sınıflandırılırlar. Bunlar: a) hidrokarbon esaslı yağlar, b) su bazlı dielektrikler ve c) gaz bazlı dielektrik akışkanlardır [39]. EEİ için alternatif dielektrik ortamlar olarak; atık sebze yağı, jatropha yağı, kanola yağı, ayçiçek yağı, hindistan cevizi yağı, zeytin yağı ve diğer bio-dönüştürülmüş yağlar da ayrıca kullanılmaktadır. EEİ’de işleme öncesi, doğru dielektriğin seçimi hem İİH açısından hem de çevresel faktörler açısından kritik önem arz etmektedir [40]. EEİ yönteminde işleme esnasında ulaşılan yüksek sıcaklıklar yüzünden hidrokarbon esaslı yağların bozularak açığa çıkardıkları hidrojen gazı, işleme aralığını ve çalışma voltajını olumsuz yönde etkilemektedir [41]. Dahası, termal enerjiyle bozulan hidrokarbon esaslı yağların oluşturduğu aerosoller ve gazların, canlılar tarafından solunması ve teması, ciddi bağırsak problemlerine neden olabilmektedir. Yine, hidrokarbon esaslı dielektrikler içerisinde, insan ve çevre sağlığını olumsuz yönde etkileyebilecek birçok zehirli bileşiklerin olduğu yapılan araştırmalarla tespit edilmiştir [42]. EEİ sanayisinde dielektrik sıvı olarak; gaz yağı (kerosene), özel üretilmiş EEİ yağları (örneğin; Shell firmasının yağları) ve sentetik yağlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu gibi hidrokarbon esaslı sıvıların, işleme esnasında bozunup zehirli gazlar çıkarması ve düşük sıcaklıklarda parlama (örneğin; gaz yağı 48 °C’de parlama gösterir) özelliği göstermelerinden dolayı son zamanlarda çevreci EEİ yöntemini benimseyen imalatçılar tarafından tercih edilmemektedir. Artık günümüzde bu olumsuz etkileri ortadan kaldıracak çevreci EEİ sıvıları daha çok kullanılmaktadır [34, 40].

Günümüz endüstrisinde hacim kalıpcılığı sanayisi sürekli olarak kendini yenilemektedir. Bu gelişmelere paralel olarak sektörde kullanılan kalıp çelikleri de güncellenmektedir. Hacim kalıplarının yapım ve tamir maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle malzeme seçimi kritik önem arz etmektedir [43]. İyi parlatılabilirlik, mükemmel nitrasyon kabiliyeti, krom kaplamaya uygunluk, yüksek kesit farklılıklarında bile yüzeylerde üniform sertlik dağılımı ve yüksek tokluk değeri özellikleriyle AISI4140 [44, 45] ve AISI 1.2723 [44, 46] çelikleri plastik ve metal enjeksiyon kalıplarının hamillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI4140 ve AISI 1.2733 çeliklerinin ısı işlem görmemiş sertlik değerlerinin piyasada bulunan ön sertleştirilmiş kalıp çeliklerinin sertlik değerlerine (30-35 HRC) yakın olması, bu gibi çeliklere nitrülme yapılarak daha sert ve daha yüksek aşınma direncine sahip yüzeyler elde edilebilmesini mümkün kılmaktadır [47]. Literatürde bu gibi sertleştirilmiş çeliklerin ve sertleştirilmiş çelik dışı metallerin EEİ yöntemi kullanılarak işlenebilirliklerinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur. Nas ve arkadaşlarının çalışmasında, AISI 1.2738 çeliği işparçası farklı işleme parametreleriyle (100, 200 ve 300 µs vurum süresi, 10, 20 ve 30 µs bekleme süresi, 10, 20 ve 30 amper boşalım akımı) elektro erozyon tezgahında grafit elektrot kullanılarak işlenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda en düşük yüzey pürüzlülük değerinin 100 µs vurum süresi, 10 µs bekleme süresi ve 20 amper boşalım akımında gerçekleştiği, en yüksek yüzey pürüzlülük değerinin ise 300 µs vurum süresi, 10 µs bekleme süresi ve 30 amper boşalım akımında gerçekleştiği belirtilmiştir [46]. Yine Nas’ın çalışmasında, sıg ve derin kriyojenik işleme tabi tutulan korozyona dayanıklı bir süper alaşım üzerinde EEİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Malzemeye uygulanan kriyojenik işleme tiplerinin EEİ performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı oluşturmak için vurum süresi (300, 400 ve 500 µs), boşalım akımı (6 ve 10 A) ve malzeme tipleri (kriyojenik işleme tabi tutulmamış, sıg kriyojenik işlenmiş ve derin kriyojenik işlenmiş) olmak üzere deneysel parametreler kullanılmıştır. Ortaya çıkan R_a ve İİH değerleri Taguchi L18 yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Taguchi bazlı gri ilişkisel analize göre, hem R_a hem de İİH değeri için optimal parametreler sırasıyla kriyojenik işleme, vurum süresi ve boşalım akımı olarak belirlenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak elde edilen yanıt tablosundan R_a ve İİH değerleri için en etkili faktörler belirlenmiştir. Performansı etkileyen parametreleri belirlemeye yönelik ANOVA sonuçlarına göre, boşalım akımı değeri R_a değerini %74,79 oranında etkilerken, İİH değerini %86,43 oranında etkileyen en etkili faktör olduğu tespit edilmiştir. Taguchi-gri ilişkisel dereceleri açısından incelendiğinde, sıg kriyojenik işleme numunesi ile gerçekleştirilen deneylerde 6 A boşalım akımı ve 300 µs’lik vurum süresi değerleri hem R_a hem de İİH değerleri bakımından en uygun parametreler olduğu belirtilmiştir [48].

Bu çalışmada, çevreci bir dielektrik sıvı olan ER100 içerisine farklı derişim oranlarında (katkısız, 5 g/l ve 10 g/l) katılan TiO₂ tozunun hassas, orta ve kaba işleme koşullarında EEİ çıktı performansları (işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, bağıl aşınma ve ortalama yüzey pürüzlülüğü) üzerine etkileri araştırılmıştır. İşleme anında elektrotu kendi eksenine etrafında 1000 dev/min hızında döndürmenin çıktı performansları üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca, delinmiş işparçası yüzeylerin özellikleri optik mikroskop yardımıyla belirlenmiştir.

II. DENEYSSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada işparçası olarak AISI4140 çeliği, elektrot olarak 2 mm dış çapa sahip ortası tek delik bakır tüp, dielektrik sıvı olarak ise yüksek parlama noktasına (110 °C) ve düşük viskoziteye sahip Euro lub EDM ER100 çevreci tip elektro erozyon sıvısı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için dalma elektro erozyon tezgahından (FURKAN EDM M25) dönüştürülmüş elektro erozyonla delik delme tezgahı (EEDDT) kullanılmıştır. EEDDT üzerindeki ana üniteler Şekil 1’de gösterilmiştir.

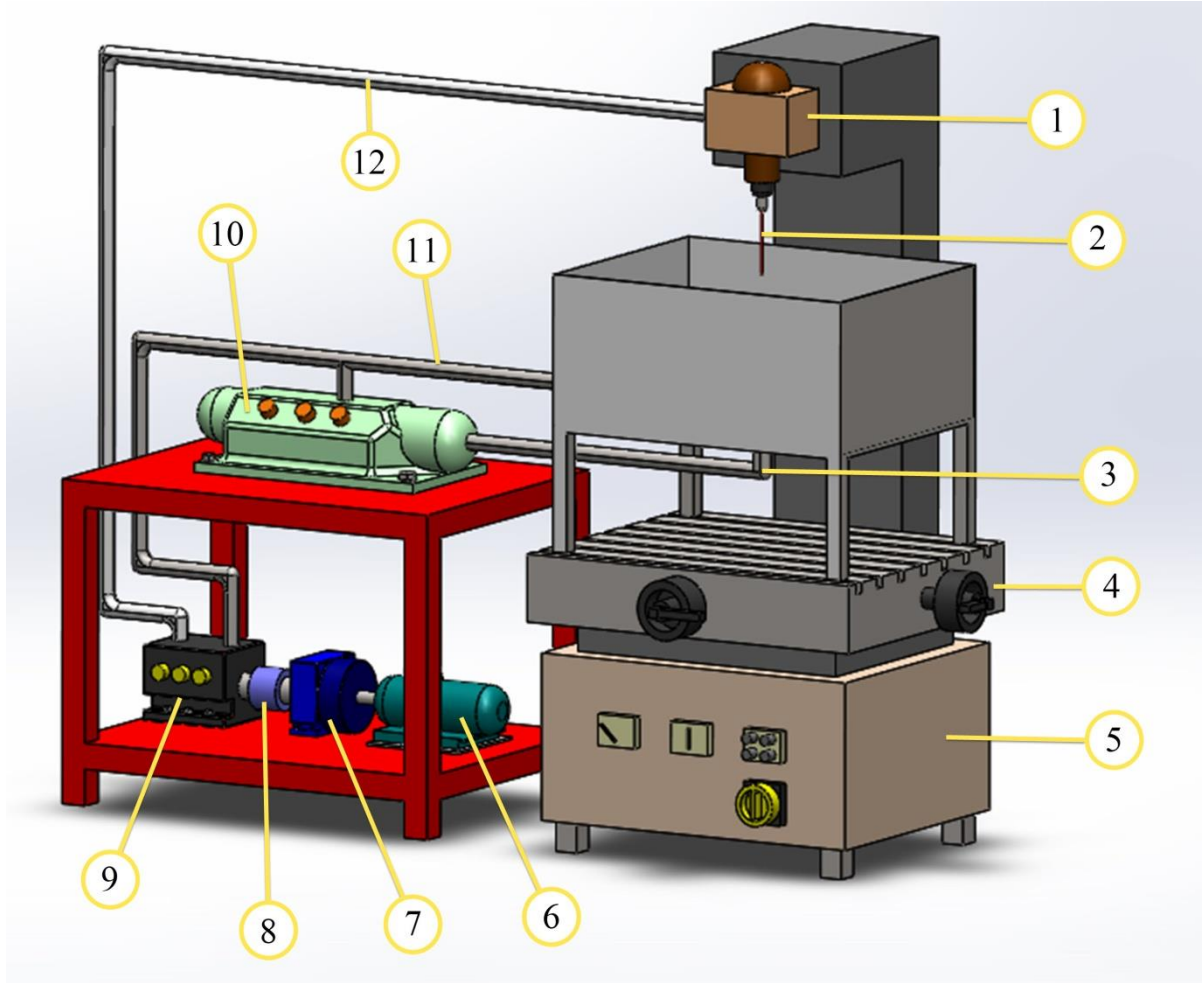


Şekil 1. EEDDT (1. elektrot döndürme sistemi, 2. tank sistemi, 3. tezgah kontrol paneli, 4. elektrik panosu, 5. dielektrik basınçlandırma ünitesi, 6. dielektrik karıştırma ünitesi) [45]

Dielektrik tank tabanında bulunan delikli borular sayesinde püskürtme mekanizmasıyla ER100 içerisine katılan TiO₂ tozlarının homojen şekilde karıştırılması gerçekleştirilmiştir. TiO₂ tozu katkılı ER100 dielektrik sıvının tank içindeki dolaşımı, yüksek debiye sahip dişli bir pompa sayesinde gerçekleştirilmiştir. Toz katkılı dielektriğin, ortası tek delik bakır elektrot içerisinden yüksek basınçla püskürtülmesi için seramik pistonlu bir pompa kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada kullanılan ER100 dielektrik sıvısının viskozite özelliklerinin akış için herhangi bir sorun oluşturmayacağı düşünülerekten, ısıtma sistemi aktif edilmemiştir. Elektrotun döndürülmesi için doğru akımla çalışan bir motor ve motor devrinin ayarlanabilmesi için doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır (Şekil 2).

Tezgahın kıvılcım boşalmaları, 80 V'luk devre gerilim ve 3 kVA güce sahip eş vurumlardan oluşacak şekilde ayarlanmıştır. EEİ parametreleri (boşalım akımı (I_d), vurum süresi (t_{on}), bekleme süresi (t_{off}), polarite, dielektrik uygulama şekli vb.) performans çıktılarını (İİH, EAH, BA, R_a ve yüzey topoğrafyası) doğrudan etkileyen parametreler oldukları için bu çalışmanın amacına uygun deney parametreleri belirlenmiştir (Tablo 1). Deneylerde kullanılan tezgahın kapasitesi ve hassasiyeti göz önünde bulundurularaktan EEİ deneyleri için kaba, orta ve hassas işleme olmak üzere 3 tip işleme tipi kararlaştırılmıştır (Tablo 2). Bu üç işleme (M1, M2 ve M3)

tiyle farklı dielektrik sıvı ortamlarda (katkısız, 5 g/l ve 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrik sıvı) işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sabit ve döner elektrot (1000 dev/min) ile işleme deneyleri gerçekleştirilerek performans çıktıları belirlenmiştir. İşparçası ve elektrotun işleme öncesi ve sonrası ağırlıkları 1/1000 hassasiyette elektronik terazi kullanılarak tartılmıştır. Her deney üç kez tekrarlanıp çıktı değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak İİH, EAH ve BA değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik 1-Eşitlik 3) [26, 45, 49].



Şekil 2. EDDT şematik görünümü (1. elektrot döndürme sistemi, 2. elektrot, 3. tank karışımı için dönüş hattı, 4. tezgah tablası, 5. elektro erozyon tezgahı, 6. elektrik motoru, 7. redüktör, 8. kaplin, 9. seramik pistonlu pompa, 10. dişli pompa, 11. tank için dielektrik gönderme hattı, 12. elektrot için dielektrik gönderme hattı)

$$\text{İİH} = \frac{(\text{işparçası ilk ağırlık} - \text{işparçası son ağırlık})/\text{yoğunluk}}{\text{işleme süresi}} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) \quad (1)$$

$$\text{EAH} = \frac{(\text{elektrot ilk ağırlık} - \text{elektrot son ağırlık})/\text{yoğunluk}}{\text{işleme süresi}} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) \quad (2)$$

$$\text{BA} = \frac{\text{EAH}}{\text{İİH}} \times 100 \quad (3)$$

Tablo 1. Deney parametreleri

Parametre	Ayarlar
Boşalım akımı, I_d (A)	3, 12, 25
Vurum süresi, t_{on} (μ s)	25, 100, 400
Bekleme süresi, t_{off} (μ s)	50, 25, 12
Çalışma süresi	12,8 s çalışma
Geri çekilme	0,8 s geri çekilme
Kutuplama	elektrot (+), işparçası (-)
İşparçası	AlSi4140 çeliği (20x20x40 mm dikdörtgenler prizması)
Elektrot tipi ve özellikleri	400 mm uzunluk ve 2 mm dış çapa sahip ortası tek delik bakır
Elektrot dönüş hızı (dev/min)	0 ve 1000
Dielektrik sıvı tipi ve basıncı (bar)	ER100, 140
Dielektrik sıvı uygulama tipi	Elektrot içerisinden
TiO ₂ tozu konsantrasyonu (g/l)	0, 5 ve 10

Tablo 2. Hassas, orta ve kaba işleme tiplerinin EEİ parametreleri

Parametre	Ayarlar
Hassas işleme (M1)	3A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi, 50 μ s bekleme süresi
Orta işleme (M2)	12A boşalım akımı, 100 μ s vurum süresi, 25 μ s bekleme süresi
Kaba işleme (M3)	25A boşalım akımı, 400 μ s vurum süresi, 12 μ s bekleme süresi

Eurolub EDM ER100 çevreci tip elektro erozyon sıvısının teknik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir [50]. TiO₂ tozunun özellikleri ise Tablo 4'te verilmiş olup ortalama tane boyutu ($d_{0,5}$) Malvern Mastersizer lazerle boyut ölçme cihazıyla belirlenmiştir [51]. Bu çalışmadaki araştırmacıların geçmiş çalışmalarında, silikon yağına karbon (15g/l) ve nişasta tozu (30 g/l) katkısıyla oluşturulan dielektrik karışımların elektro-tork-reometre cihazı vasıtasıyla elektro-reolojik özellikleri araştırılmıştır. Elektro-reoloji çalışmaları sonucunda, 10 μ m ($d_{0,5}$) altında olan karbon ve nişasta tozlarının dielektrik sıvılar içerisinde homojen şekilde dağılabildikleri ve 10 μ m altında olan tozlarla oluşturulan dielektrik karışımların viskozite değerlerinin EEİ bakımından sorun oluşturmadıkları tespit edilmiştir. Bunun üzerine, 10 μ m ($d_{0,5}$) altında olan karbon ve nişasta toz malzemelerine her hangi bir öğütme işlemine gerek olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda bu çalışmadaki araştırmacıların daha önceki deneysel çalışmalarından edindikleri tecrübeler göz önünde bulundurularaktan 5,48 μ m ($d_{0,5}$) boyuta sahip TiO₂ tozunun ER100 dielektrik sıvısına katkısının EEİ'de dielektrik akış bakımından herhangi bir sorun oluşturmayacağı düşünüldükten öğütme işlemi gerçekleştirilmemiştir [26, 45, 52, 53].

Çalışmada, farklı toz derişim oranlarıyla oluşturulan ER100 karışımların işleme performansı açısından incelenmesi temel amaç olduğu için dielektrik püskürtme basıncı ve elektrot döndürme hızı parametrelerinin sabit değerler alınmasına karar verilmiştir. ER100 dielektrik sıvısının elektrot içerisindeki püskürtme basınç değerine karar verilirken, yine bu çalışmadaki araştırmacıların daha önceki deneysel çalışmalarından edindikleri tecrübelerden faydalanılmıştır [26]. Buna göre, Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmalarında [30, 31], 100 bar püskürtme basıncıyla deiyonize su kullanılarak ortası delik 2 mm'lik elektrotlarla Ti6Al4V ve IN718 işparçalarına işlemler yapıldığı tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan ER100 sıvısının gerek kıvamı ve gerekse elektro reolojik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda püskürtme basıncının 100 bar değerinden daha yüksek değerde olması gerektiği düşünülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmada, ER100 dielektriğin püskürtme basıncı 140 bar olarak kabul edilmiştir.

Elektrotun kendi ekseni etrafındaki dönüş hızına karar verilirken literatürdeki diğer deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır. Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında [32], farklı hızlarda (200, 400 ve 600 dev/min) dönen elektrotların işleme performansına çok büyük etkiler oluşturmadığı (elektrot hızında her 200 dev/min'lik artış, İİH'de yaklaşık %16'lık artış sağlamak) rapor edilmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada, dönmeyen ve maksimum hızda dönen (elektrot döndürme sistemi maksimum 1000 dev/min ile dönebilmektedir) elektrotlar arasındaki ara hız değerlerinin araştırılmasına gerek duyulmamıştır. Temelde, elektrotun maksimum hızda dönmemesinin ve dönmemesinin performans çıktıları üzerine ne gibi etkiler oluşturacağını araştırılması amaçlanmıştır. ER100 dielektrik sıvısı içerisine yapılacak toz katkıları belirlenirken ise, literatürdeki benzer çalışmalardan faydalanılarak TiO₂ tozu katkısının 5 ve 10 g/l olmasına karar verilmiştir (Tablo 1) [25, 27].

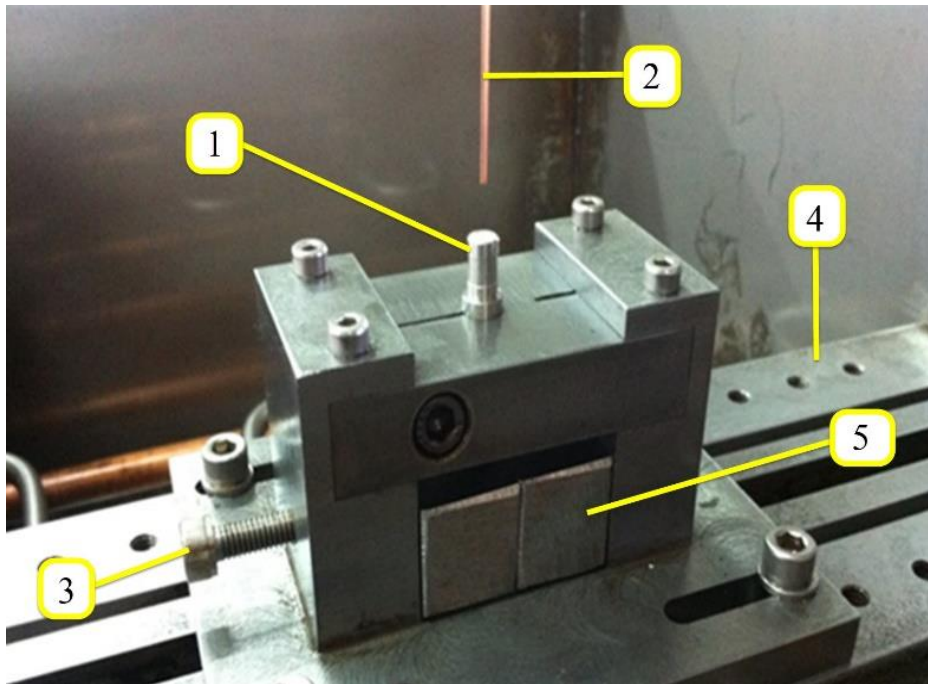
Tablo 3. Eurolub EDM ER100 çevreci tip EEİ sıvısının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Hal	Sıvı, renksiz (şeffaf)
Buhar basıncı	0,04 kPa
Viskozite (ASTM D445)	2,17 Pa.s 40 °C'de
Yoğunluk	0,766 g/cm ³ 20 °C'de
Suda çözünbilme	0,1 %
Isı iletkenliği	0,15 50 °C'de
Parlama noktası	101 °C
Akma noktası (ASTM D97)	-5 °C
Ph (TS 4614)	5,0

Tablo 4. TiO₂ tozu teknik özellikleri

Özellik	Değer
Cas No	100808
Ticari isim / Tedarik	Titanium oxide / Merck Co.
Yoğunluk	6,43 g/cm ³ 20 °C'de
Toz boyutu (d _{0,5})	5,48 µm
Suda çözünürlük	79,87 g/mol 20 °C'de
Kaynama noktası	1900 °C

20x20 mm kare çubuktan (lamadan) 40 mm uzunluğunda olacak şekilde kesilen dikdörtgenler prizması biçimindeki AISI4140 çeliği işparçasının tüm yüzeylerine taşlama işlemi uygulanarak yüzeyler parlatılmıştır. İşparçalarına delinecek 20 mm derinliğindeki deliklerin işleme sonrası daha rahat incelenebilmesi için iki adet işparçası tank içerisindeki mengineye birleştirilerek ara yüzey oluşturulmuş ve delme işlemi bu ara yüzeyde gerçekleştirilmiştir. İşleme esnasında ortası delik elektrotun salınımlarını engellemek ve eksen kaçıklığını gidermek için seramik kılavuz kullanılmıştır (Şekil 3). Delme işlemi sonunda işparçaları birbirinden ayrılmış ve gerekli yüzey incelemeleri (yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı) gerçekleştirilmiştir. İşparçası R_a ölçümleri Marsurf PS10 tarayıcı uçlu taşınabilir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazıyla yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. Tank içerisindeki mengine sistemi (1. seramik kılavuz, 2. elektrot, 3. sıkıştırma vidası, 4. tabla, 5. işparçası) [45]



Şekil 4. EEİ yöntemiyle delinmiş işparçası yüzeyinin Mahr MarSurf PS 10 cihazıyla yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Ölçümlerde örnekleme uzunluğu standart tablolardan 0,8 mm ve ölçüm uzunluğu 2,5 mm olarak seçilmiştir. İşparçalarının işlenmiş (delik) yüzeylerinden üç farklı noktadan (delik girişi, ortası ve çıkışı) olacak şekilde alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması kullanılmıştır [54]. Mikroyapı incelemesi Olympus marka dijital kamera donanımlı optik mikroskopla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemesinden önce, işparçaları %2 Nitrik asit + %98 saf Ethanol çözeltisiyle 45 dakika dağlanmış. Daha sonra, dağlanan işparçası yüzeyleri sodyum hipoklorit + %5 toz anyonik madde karışımıyla fırçalanarak temizlenmiştir. 10-20 kat büyütmeyle önceden belirlenen noktalardan mikroyapı fotoğrafları çekilmiş ve incelenmiştir [26, 45, 49, 54].

III. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

A. EEİ Performans Çıktıları

Şekil 5'ten anlaşılacağı üzere sabit (dönmeyen) elektrot kullanılarak yapılan EEİ deneylerinde TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) işleme hızı değerlerini artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı İİH değerlerini M1 için %52,94, M2 için %8,44 ve M3 için %30,07 oranlarında artırmıştır. Yani, dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde İİH değeri açısından ortalama %30,48'lik bir artış elde edilmiştir. Benzer şekilde 10 g/l TiO₂ tozu katkısı İİH değerlerini M1 için %100, M2 için %21,47 ve M3 için %49,64 oranlarında artırdığı tespit edilmiştir. Bu durumda, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %57,03'lük bir işleme hızı artışı sağlanmıştır.

Yine Şekil 6 incelendiğinde, döner elektrot kullanılarak yapılan EEİ deneylerinde TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde İİH değerlerini artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde İİH değeri açısından ortalama %16,72'lik bir artış elde edilmiştir (M1 için %13,13, M2 için %15,12 ve M3 için %21,90 oranlarında artış). Benzer şekilde, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %25,66'lık bir işleme hızı artışı sağlanmıştır (M1 için %18,48, M2 için %25,03 ve M3 için %33,48 oranlarında artış).

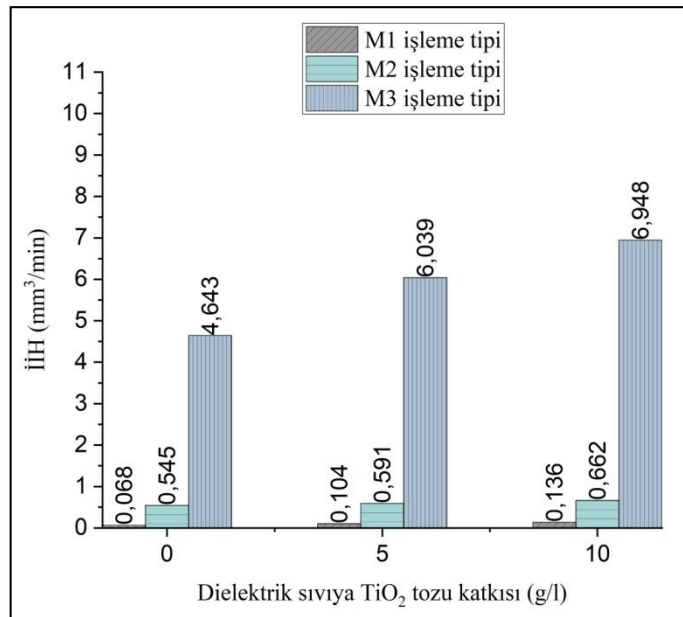
Yapılan EEİ deneyleri sonucunda elektrotu döndürmenin İİH değerini her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) artırdığı Şekil 5 ile Şekil 6 kıyaslandığında anlaşılmaktadır. Katkısız dielektrik, 5 g/l ve 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrik sıvılar için sabit ve döner elektrot kullanılarak yapılan deney sonuçları kıyaslandığında; elektrotu döndürmek İİH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %99,5 artış sağlarken, M2 işleme tipinde ortalama %13,75 ve M3 işleme tipinde ortalama %9,38 oranlarında artışlara olanak sağlamıştır (Tablo 5).

Tablo 5. 1000 dev/min hızında dönen elektrotun İİH değerleri üzerine etkileri

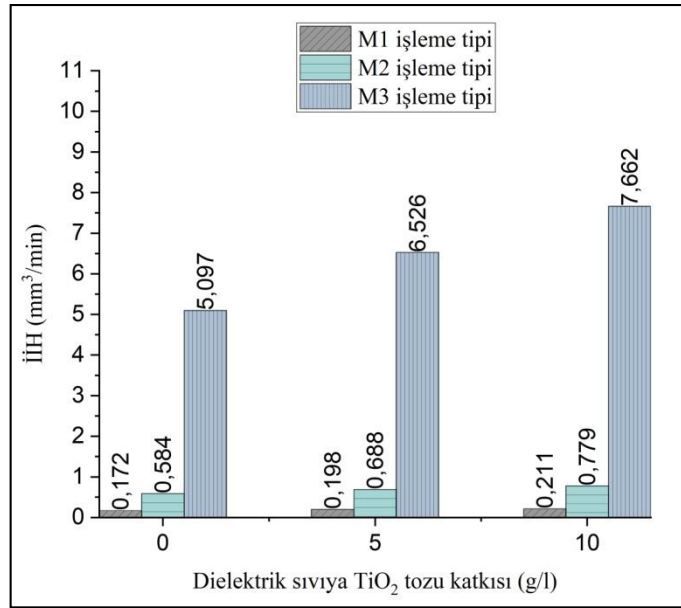
İşleme tipi	Dielektrik sıvılarda İİH değerinin işleme tiplerine göre % artışı			% Ort. değişim
	Katkısız	5 g/l TiO ₂ tozu katkılı	10 g/l TiO ₂ tozu katkılı	
M1	152,94 (+)	90,38 (+)	55,14 (+)	99,5 (+)
M2	7,16 (+)	16,41 (+)	17,67 (+)	13,75 (+)
M3	9,78 (+)	8,06 (+)	10,28 (+)	9,38 (+)

M2 ve M3 işleme tiplerine nazaran M1 işleme tipindeki bu çarpıcı artışın en temel sebebinin; hassas işleme koşullarında (M1: $I_d = 3A$, $t_{on} = 25 \mu s$ ve $t_{off} = 50 \mu s$) döner elektrotun işleme ortamında oluşturduğu girdap etkisini daha belirgin biçimde gösterebildiğidir. Çünkü, M1 işleme tipinde en uzun süre bekleme süresi (50 μs) ve en düşük vuruş süresi (25 μs) değerlerinin olması sayesinde işleme ortamındaki talaşların işparçası yüzeyine tekrardan katılmasına fırsat vermeden elektrotu döndürerek akışı hızlandırılmış dielektrik sıvının, talaşları ortamdaki daha hızlı uzaklaştırabilirdiği kanaatine varılmıştır. Bu sebeplerden ötürü, M1 işleme tipi için elektrotu döndürmenin İİH değerlerini daha fazla artırdığı düşünülmektedir. Diğer iki işleme tipinde (M2 ve M3) elektrotun döndürülmesi, gerek vuruş süresi değerleri ve gerekse bekleme süresi değerleri bakımından oluşan girdap etkisinin nispeten daha az görülmesine ve bu nedenle İİH değerlerinin nispeten daha az artmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5 ve 6 birlikte incelendiğinde dielektrik sıvıya TiO₂ tozu katkısı hem sabit hem de döner elektrot kullanılan M1, M2 ve M3 işleme tiplerinde İİH değerlerini artırdığı rahatlıkla görülebilmektedir. Her üç işleme tipindeki bu artışların temel sebepleri; işleme ortamlarındaki dielektrik sıvı iletkenliğiyle işleme parametrelerinin (I_d ve t_{on}) oldukça uyumlu olmasıdır. Ayrıca, TiO₂ tozu katkısı işleme ortamındaki dengeyi sağlayarak işleme esnasındaki boşalım kıvılcıklarının işparçası yüzeyine eşit olarak yayılmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu işleme mekanizması sayesinde TiO₂ tozu katkısının genel olarak İİH değerlerinin artmasına katkı sağladığı keşfedilmiştir. Dielektrik sıvıya çeşitli toz katkılarının İİH'yi artırdığı, toz parçalarının boşalım enerjisini dağıtarak verimliliği artırdığı literatürdeki birçok çalışmada da rapor edilmiştir [5, 10, 25, 26, 28, 29, 32, 33, 35]. Yine bu çalışma ile kıyaslanabilecek Baseri ve arkadaşlarının [35] çalışmasında, gaz yağı içerisine 1 g/l TiO₂ tozu katkısı, İİH değerlerini tüm işleme koşullarında artırdığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda gerçekleştirilen deneysel çalışma, Baseri ve arkadaşlarının çalışmasıyla da örtüşmektedir.



Şekil 5. EEİ'de sabit elektrotla farklı işleme tiplerindeki İİH değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi



Şekil 6. EEI'de döner elektrotla farklı işleme tiplerindeki İİH değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi

DeneySEL çalışmalar esnasında, litreye 10 gramdan fazla yapılan TiO₂ tozu katkılarının ER100 dielektrik sıvısının akış özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Nispeten yüksek toz konsantrasyonundan dolayı 2 mm dış çapa sahip bakır elektrotun iç deliğinde tıkanıklık oluşarak dielektrik sıvının elektrot içerisinden akmadığı görülmüştür. Yaşanan tıkanıklık durumunun benzeri bu çalışmadaki araştırmacıların daha önceki çalışmasında da görülmüştür [26]. Artan toz konsantrasyonuyla dielektrik karışımın viskozite değeri arttığı için kesit alanı dar olan elektrot içerisinde dielektrik sıvı geçememiştir. Diğer bir taraftan tank tabanında TiO₂ tozu tortulanması ve topaklanması görülmüştür. Görülen bu tortulanmanın ve topaklanmanın tank tabanında bulunan karıştırma ünitesinin yetersiz kalmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Tank tabanında bulunan ve püskürtme etkisi oluşturmak için imal edilmiş delikli bakır boru sistemi yüksek toz konsantrasyonlarında iyi bir karıştırma performansı gösterememiştir. Ayrıca, dielektrik sıvıda artan toz konsantrasyonuyla işleme dengesinin bozulduğu ve ark tipi boşalmaların (kısa devre boşalmaları) arttığı tespit edilmiştir. Yapılan denemelerin sonucunda, litreye 10 gramdan daha fazla TiO₂ tozu katkılarının deneysel olarak araştırılmasına gerek duyulmamıştır. Bu çerçevede, gerçekleştirilen deneysel çalışmada artan toz konsantrasyonunun olumsuz etkileri literatürdeki benzer çalışmalarla da paralellik göstermektedir. Örneğin, Baseri ve arkadaşları [35], gaz yağı dielektrik içerisine 0-1-2-3 g/l oranlarında nano boyutta TiO₂ tozu katkısıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, 1 g/l katkı oranından sonraki her TiO₂ tozu katkısı işparçası ve elektrot arasında anormal boşalmaları artırdığını ve işlemeyi olumsuz yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Fakat, bu çalışmada artan toz konsantrasyonunun olumsuz etkileri 10 g/l TiO₂ tozu katkı oranlarından sonraki katkı oranlarında görünürken, Baseri ve arkadaşlarının çalışmasında bu etkiler 1 g/l katkı oranlarından sonraki oranlarda görülmesinin en temel sebebinin; Baseri ve arkadaşlarının çalışmasında nano boyutta toz kullanılmasıdır. Çünkü nano boyuttaki TiO₂ tozu katkısı dielektrik sıvı içerisinde daha homojen ve hızlı biçimde karışabilmektedir. Dolayısıyla bu olumsuz etkileri daha düşük toz konsantrasyonlarında gösterebilmektedir.

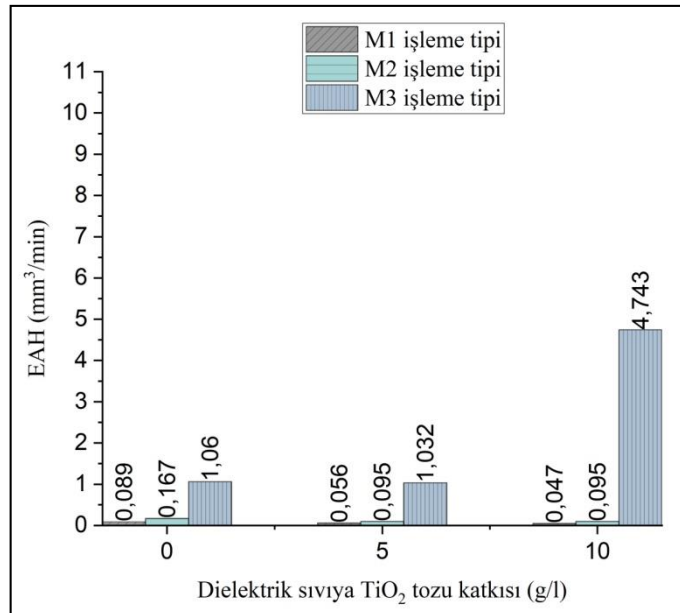
Şekil 7'de görüleceği üzere sabit elektrotla yapılan EEI deneylerinde, TiO₂ tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde elektrot aşınmasını azaltırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte elektrot aşınmasını artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde EAH değerinin ortalama %45,81 oranında (M1 için %58,93, M2 için %75,8 ve M3 için %2,71 oranlarında EAH azalması) azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde 10 g/l TiO₂ tozu katkısı EAH değerlerini M1 için %89,36 ve M2 için %75,8 oranlarında azaltırken, M3 için %347,45 oranlarında artırdığı tespit edilmiştir. M3 işleme tipi için EAH değerinin bu denli yüksek oranda artmasına sebep olan en önemli parametre boşalım akımıdır (I_d = 25 A). Çünkü, M3 işleme tipi diğer işleme tiplerine nazaran daha saldırgan bir işleme tipidir ve normalden daha fazla talaş kaldırmak amacıyla kurgulanmıştır. Daha yüksek işleme değerleri

elde etmek isterken daha fazla elektrot aşınmasının da bu durumda kaçınılmaz olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Baseri ve arkadaşlarının [35], gaz yağı dielektrik içerisinde 0-1-2-3 g/l oranlarında nano boyutta TiO_2 tozu katkısıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, TiO_2 tozu katkısının EAH değerlerini düşürdüğü rapor edilmiştir. Bu bağlamda, gerçekleştirilen çalışmada TiO_2 tozu katkısının EAH değerlerini düşürdüğü tespiti literatürdeki diğer çalışmalar ile de paralellik göstermektedir. Yine, Şekil 7'ye bakıldığında döner elektrotla EEİ deneylerinde, TiO_2 tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde EAH değerini azaltırken sadece M3 işleme tipinde 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrikte EAH değerini artırmıştır. 5 g/l TiO_2 tozu katkısıyla oluşturulan dielektrik sıvıda her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde EAH değerinin ortalama %39,15 (M1 için %49,72, M2 için %55,19 ve M3 için %12,54 oranlarında EAH azalması) oranında azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde 10 g/l TiO_2 tozu katkısı EAH değerlerini M1 için %219,05 ve M2 için %73,16 oranlarında azaltırken, M3 için %82 oranında artırdığı tespit edilmiştir. M1 işleme tipi için litreye 10 gram TiO_2 tozu katkılı işlemlerde EAH değerinin düşmesindeki en önemli sebep ise; M1 işleme tipindeki düşük vurum süresi (25 μs) ve yüksek bekleme süresi (50 μs) değerleridir. Bu işleme parametrelerinde elektrot aşınması açısından işlemin dengeli olduğu söylenebilir. Fakat, M3 işleme tipi için EAH değerinin artmasının en temel sebebi; yine boşalım akımıdır.

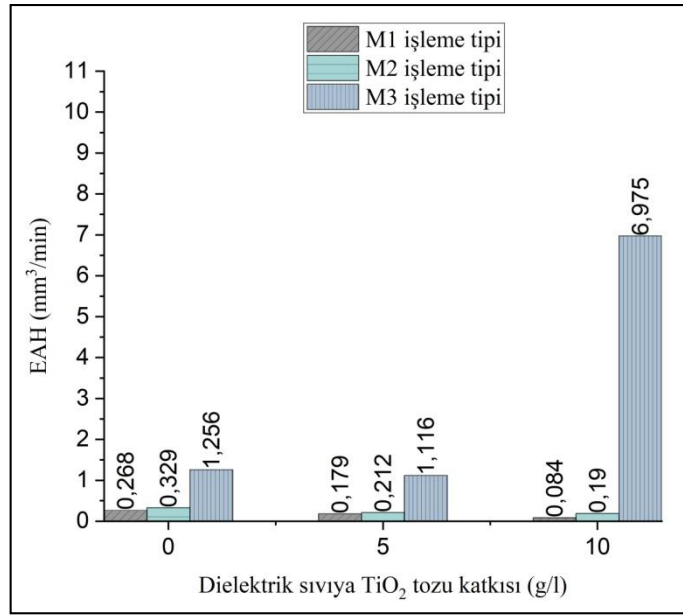
Şekil 7 ve Şekil 8 birlikte değerlendirildiğinde, EEİ'de elektrotu döndürmenin EAH değerini her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) artırdığı görülebilmektedir. Katkısız dielektrik, 5 g/l ve 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrikler için sabit ve döner elektrot kullanılarak yapılan deney sonuçları kıyaslandığında; elektrotu döndürmek EAH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %166,50 artış sağlarken M2 işleme tipinde ortalama %106,72 ve M3 işleme tipinde ortalama %24,57 oranlarında artışlara sebep olmuştur (Tablo 6).

Tablo 6. 1000 dev/min hızında dönen elektrotun EAH değerleri üzerine etkileri

İşleme tipi	Dielektrik sıvılarda EAH değerinin işleme tiplerine göre % artışı			% Ort. değişim
	Katkısız	5 g/l TiO_2 tozu katkılı	10 g/l TiO_2 tozu katkılı	
M1	201,12 (+)	219,64 (+)	78,72 (+)	166,50 (+)
M2	97 (+)	123,16 (+)	100 (+)	106,72 (+)
M3	18,5 (+)	8,14 (+)	47,06 (+)	24,57 (+)



Şekil 7. EEİ'de sabit elektrotla farklı işleme tiplerindeki EAH değerlerinin dielektriğe katılan TiO_2 tozu oranıyla değişimi



Şekil 8. EEİ'de döner elektrotla farklı işleme tiplerindeki EAH değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi

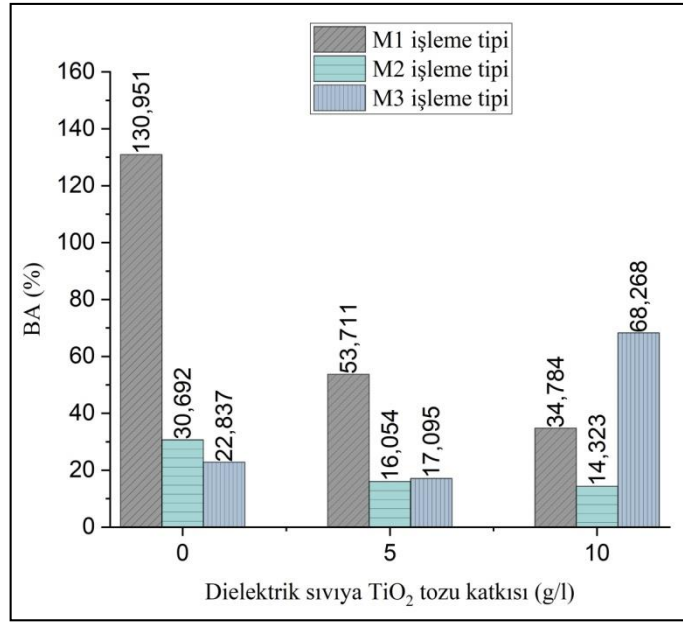
Sabit elektrotla yapılan işlemlerde elektrotun uç kısımlarında daha çok aşınma meydana gelirken, döner elektrotla yapılan işlemlerdeki bu aşınmanın silindirik elektrotun tüm çeperlerine eşit olarak yayılabildiği görülmüştür. Ayrıca, döner elektrot kullanılarak yapılan deneylerde elektrotların uç kısımlarında dönme etkisinden ötürü bariz konikleşmeler de tespit edilmiştir. Bu tespitlerin ışığında, elektrotu döndürerek yapılan işlemlerde EAH değerlerinin artmasındaki temel sebebin; işleme esnasında oluşan kıvılcımların silindirik elektrotun tüm çeperlerine dağılabilmesi ve birim zamanda daha fazla elektrotun aşınmasına neden olabildiği yönündedir.

Şekil 9 incelendiğinde, BA değerlerinin tıpkı EAH değerleri gibi özellikler sergilediği anlaşılabilmektedir. Sabit elektrotla EEİ deneylerinde, TiO₂ tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde BA değerlerini azaltırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte BA değeri artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde BA değerinin ortalama %89,53 oranında (M1 için %143,81, M2 için %91,18 ve M3 için %33,59 oranlarında BA azalması) azaldığı görülmüştür. 10 g/l TiO₂ tozu katkısı ise BA değerlerini M1 için %276,47 ve M2 için %114,28 oranlarında azaltırken, M3 için %66,55 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Döner elektrotla yapılan EEİ deneylerinde ise, TiO₂ tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde BA değerini azaltırken sadece M3 işleme tipinde 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte BA değerini artırmıştır (Şekil 10). Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde BA değeri ortalama %66,51 (M1 için %72,64, M2 için %82,86 ve M3 için %44,03 oranlarında BA azalması) oranında azalmıştır. Benzer şekilde 10 g/l TiO₂ tozu katkısı BA değerlerini M1 için %292,46 ve M2 için %131,37 oranlarında azaltırken, M3 için %72,94 oranında artırdığı tespit edilmiştir.

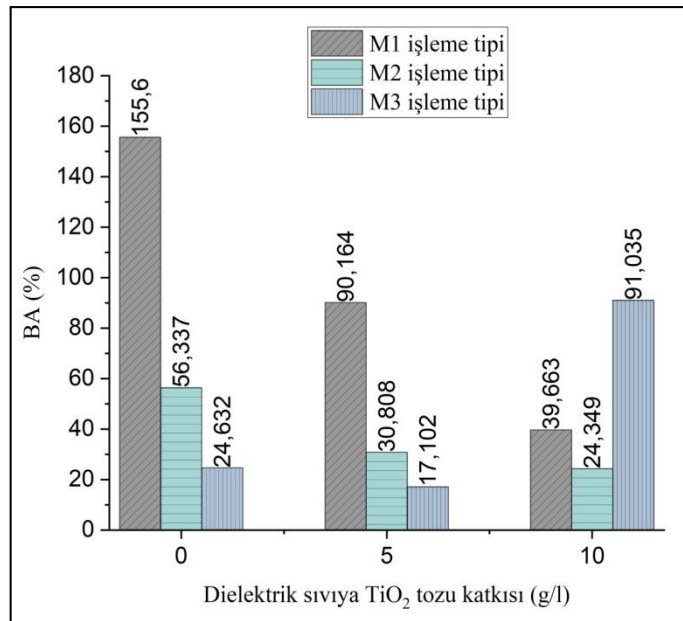
Şekil 9 ve Şekil 10 birlikte değerlendirildiğinde, EEİ'de elektrotu döndürmenin BA değerini her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) artırdığı görülebilmektedir. Katkısız dielektrik, 5 g/l ve 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikler için sabit ve döner elektrot kullanılarak yapılan deney sonuçları kıyaslandığında; elektrotu döndürmek BA değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %22,87 artış sağlarken M2 işleme tipinde ortalama %45,53 ve M3 işleme tipinde ortalama %10,78 oranlarında artışlara sebep olmuştur (Tablo 7). Daha önce de ifade edildiği üzere, elektrotu döndürerek yapılan işlemlerde EAH değerlerinin artmasından ötürü, BA değerleri de artış göstermektedir. EEİ'de genel olarak %100'ün üzerindeki BA değerleri çok hoş karşılanmasa da, özellikle hassas işlemeye ihtiyaç duyulan hacim kalıpcılığında bu durum göz ardı edilebilmektedir.

Tablo 7. 1000 dev/min hızında dönen elektrotun BA değerleri üzerine etkileri

İşleme tipi	Dielektrik sıvılarda BA değerinin işleme tiplerine göre % artışı			% Ort. değişim
	Katkısız	5 g/l TiO ₂ tozu katkılı	10 g/l TiO ₂ tozu katkılı	
M1	15,87 (+)	40,43 (+)	12,30 (+)	22,87 (+)
M2	45,52 (+)	47,89 (+)	41,18 (+)	45,53 (+)
M3	7,29 (+)	0,04 (+)	25 (+)	10,78 (+)



Şekil 9. EEI'de sabit elektrotla farklı işleme tiplerindeki BA değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi



Şekil 10. EEI'de döner elektrotla farklı işleme tiplerindeki BA değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi

Daha hızlı işleme için kurgulanmış M3 işleme tipinde ($I_d = 25$ A, $t_{on} = 400$ μ s ve $t_{off} = 12$ μ s), elektrot ve işparçası için bütün parametrelerin aynı olmasına rağmen, nispeten yüksek boşalım akımı değeri kullanıldığı durumlarda vurum süresi değeri ve bekleme süresi değeri elektrot için kritik önem arz etmektedir. M3 işleme tipindeki nispeten yüksek vurum süresi ve düşük bekleme süresi değerleri olduğu için elektrotun işparçasına nazaran daha fazla aşınmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla, M3 işleme tipi için litreye 10 gram TiO_2 tozu katkılı işlemlerde, BA değerini artmasının en önemli sebebinin; yüksek vurum süresi ve düşük bekleme süresi değerleri olduğu düşünülmektedir. BA değerinin, boşalım akımı ve vurum süresi parametreleriyle genel olarak ters orantılı olduğu söylenebilir (Şekil 9-10). Fakat bu çalışmada, M3 işleme tipinde 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrik sıvıda yapılan işlemlerdeki BA değeri istisnai bir durumdadır. Bu durumun en önemli sebebi; artan boşalım akımı ve vurum süresi değerleri, İİH değerini EAH değerine nazaran daha çok artırmakta olduğudur. Böylece, BA değeri hesabında İİH değeri payda da olduğu için BA değeri azalmaktadır.

Şekil 11'den anlaşılacağı üzere sabit elektrot kullanılarak yapılan EEİ deneylerinde TiO_2 tozu katkısı her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) R_a değerlerini azaltmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %5,27, M2 için %8 ve M3 için %2,95 oranlarında azaltmıştır. Yani, dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde R_a değeri açısından ortalama %5,41'lik bir azalma elde edilmiştir. Benzer şekilde 10 g/l TiO_2 tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %8,15, M2 için %15,07 ve M3 için %6,21 oranlarında azalttığı tespit edilmiştir. Bu durumda, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO_2 tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %9,81'lik bir R_a değeri düşüşü sağlanmıştır.

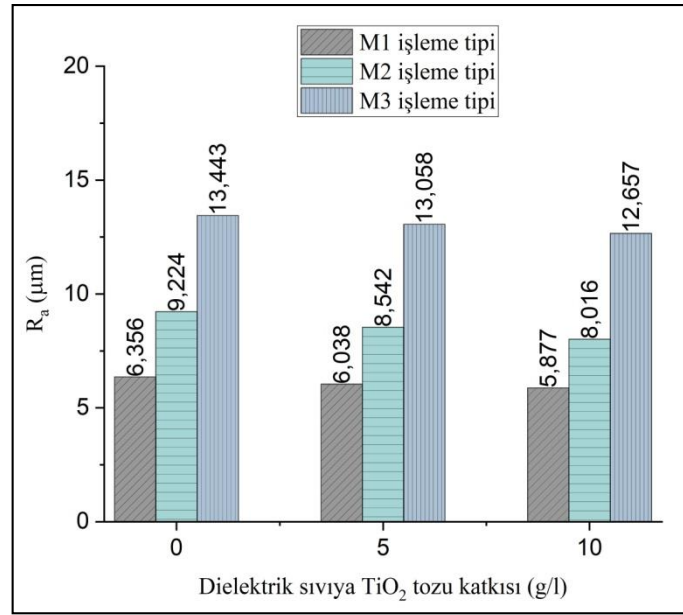
Döner elektrotla yapılan EEİ deneylerinde ise, TiO_2 tozu katkısı her işleme tipinde R_a değerlerini benzer şekilde azaltmıştır (Şekil 12). Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde R_a değeri için ortalama %7,87'lik bir azalma elde edilmiştir (M1 için %10,41, M2 için %8,85 ve M3 için %4,36 oranlarında azalma). Yine, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO_2 tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %13,04'lük bir R_a değeri düşüşü sağlanmıştır (M1 için %17,82, M2 için %11,76 ve M3 için %9,54 oranlarında azalma). Elektrotu döndürmenin R_a değerini her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) düşürdüğü Şekil 11 ile Şekil 12 karşılaştırıldığında anlaşılmaktadır. Katkısız dielektrik, 5 g/l ve 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrik sıvılar için sabit ve döner elektrot kullanılarak yapılan deney sonuçları kıyaslandığında; elektrotu döndürmek R_a değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %14,38 azalma sağlarken, M2 işleme tipinde ortalama %3,54 ve M3 işleme tipinde ortalama %7,82 oranlarında azalmaya olanak sağlamıştır (Tablo 8).

ER100 dielektrik sıvısına TiO_2 tozu katkısı kaba, orta ve hassas işleme tiplerinde R_a değerlerini düşürerek yüzey özelliklerini iyileştirdiği hem sabit hem de döner elektrot kullanılarak yapılan deneylerden tespit edilmiştir. Bu çalışmada, TiO_2 tozu katkısının işlenmiş işparçası R_a değerleri üzerine etkileri, literatürdeki birçok çalışmayla benzerlik sergilemektedir. Örneğin, Wang ve arkadaşlarının çalışmasında [25], dielektrik sıvıya 10 g/l Al tozu katkısı, Inconel 706 işparçalarının aynı işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü değerlerini %25,9 oranında azalttığı belirtilmiştir. Paul ve arkadaşlarının çalışmasında [33] ise, dielektrik sıvı içerisine katılan Cu tozlarının, özellikle yüksek işleme parametreleri kullanılarak yapılan işlemlerde Inconel 718 işparçasının R_a değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

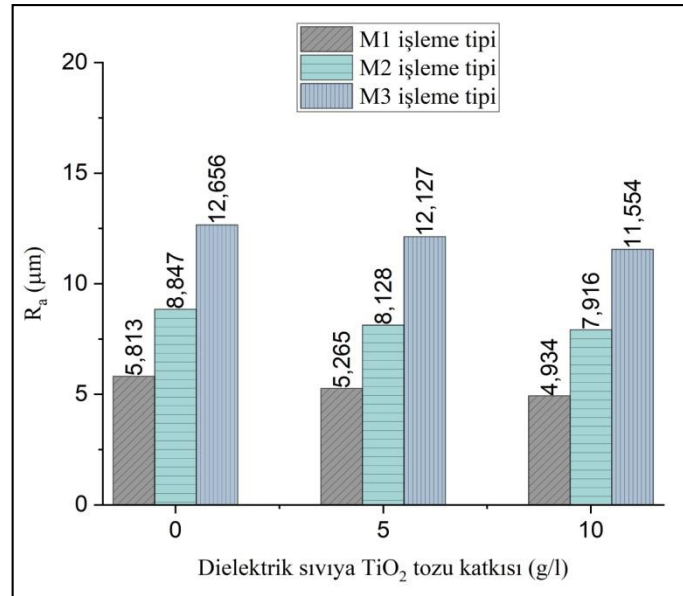
Tablo 8. 1000 dev/min hızında dönen elektrotun R_a değerleri üzerine etkileri

İşleme tipi	Dielektrik sıvılarda R_a değerinin işleme tiplerine göre % azalışı			
	Katkısız	5 g/l TiO_2 tozu katkılı	10 g/l TiO_2 tozu katkılı	% Ort. değişim
M1	9,34 (-)	14,68 (-)	19,11 (-)	14,38 (-)
M2	4,26 (-)	5,09 (-)	1,26 (-)	3,54 (-)
M3	6,22 (-)	7,68 (-)	9,55 (-)	7,82 (-)

Yine, Kumar ve arkadaşlarının çalışmasında [5], Inconel 825 işparçasının işlenmesinde, dielektrik sıvıya iletken olmayan nano boyuttaki Al_2O_3 tozu katkısı R_a değerini 1,487 μ m değerine kadar düşürebildiği ve bu sayede R_a değerinde %63 oranında bir azalmanın olduğu bildirilmiştir. Benzer şekilde bu deneysel çalışmayla örtüşebilecek Baseri ve arkadaşlarının çalışmasında [35], gaz yağı içerisine katılan nano boyuttaki TiO_2 tozlarının tüm işleme koşullarında işparçası işlenmiş yüzeylerinin R_a değerlerini düşürdüğü belirtilmiştir.



Şekil 11. EEI'de sabit elektrotla farklı işleme tiplerindeki R_a değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi



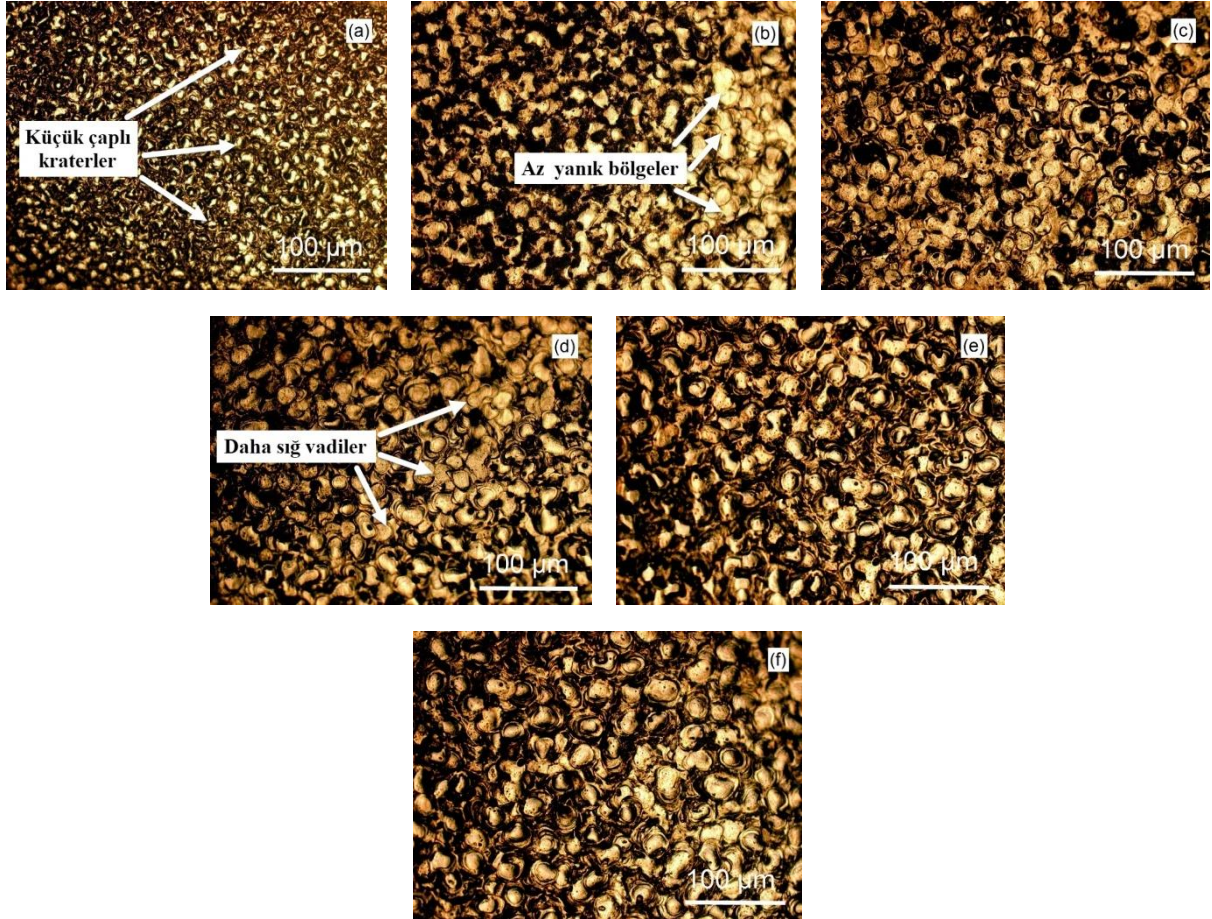
Şekil 12. EEI'de döner elektrotla farklı işleme tiplerindeki R_a değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi

R_a değerlerinin boşalım akımı ve vurum süresi parametreleriyle doğru orantılı olduğu deneysel çalışmalardan tespit edilmiştir. Artan boşalım akımı ve vurum süresi değerleri (M3 işleme tipi) işparçaların R_a değerlerini artırırken, düşük boşalım akımı ve vurum süresi değerleri (M1 işleme tipi) çeliklerin R_a değerlerini düşürmektedir (Şekil 11-12).

B. Optik Mikroskop Görüntüleri

Şekil 13'te sabit ve döner elektrot kullanılarak farklı konsantrasyonlarda TiO₂ tozu katkılı dielektrik sıvılarda M1 işleme tipiyle delinmiş işparçalarının işlenmiş yüzeylerinin optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafları

verilmiştir. Yine benzer biçimde, Şekil 14'te M2 ve Şekil 15'te ise M3 işleme tipiyle delinmiş işparçalarının optik mikroskopa çekilmiş fotoğrafları görülmektedir.



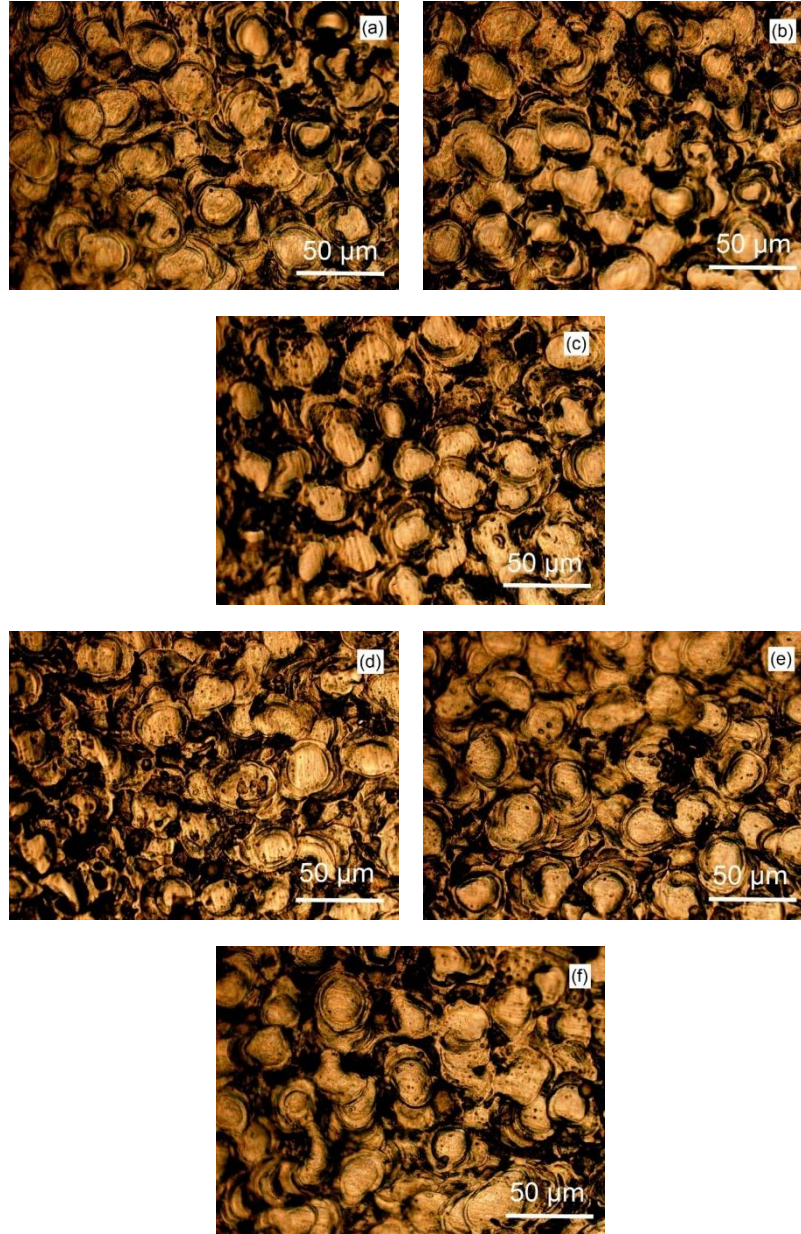
Şekil 13. M1 işleme tipiyle işlenmiş yüzeyler: a) sabit elektrotla katkısız dielektrikte, b) döner elektrotla katkısız dielektrikte, c) sabit elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, d) döner elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, e) sabit elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, f) döner elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte

M1, M2 ve M3 işleme tipleriyle delinmiş işparçalarının işlenmiş yüzeylerin optik fotoğrafları genel olarak değerlendirilir ve Şekil 13-15'in (a), (c) ve (e) fotoğrafları kıyaslanırsa, TiO₂ tozu katkılarının yüzey topografyasında belirgin farklılıklar oluşturabildiği görülebilmektedir. Burada TiO₂ tozu katkısıyla işlenmiş parçaların birim yüzey alanında daha çok sayıda fakat daha sığ ve küçük çaplı kraterlerin olduğu tespit edilmiştir. Yine, Şekil 13-15'in (b), (d) ve (f) fotoğraflarına bakıldığında, elektrotun dönme etkisiyle az da olsa yüzeylerdeki tepelerin sivri uçlarının yuvarlatılmış oldukları görülebilmektedir.

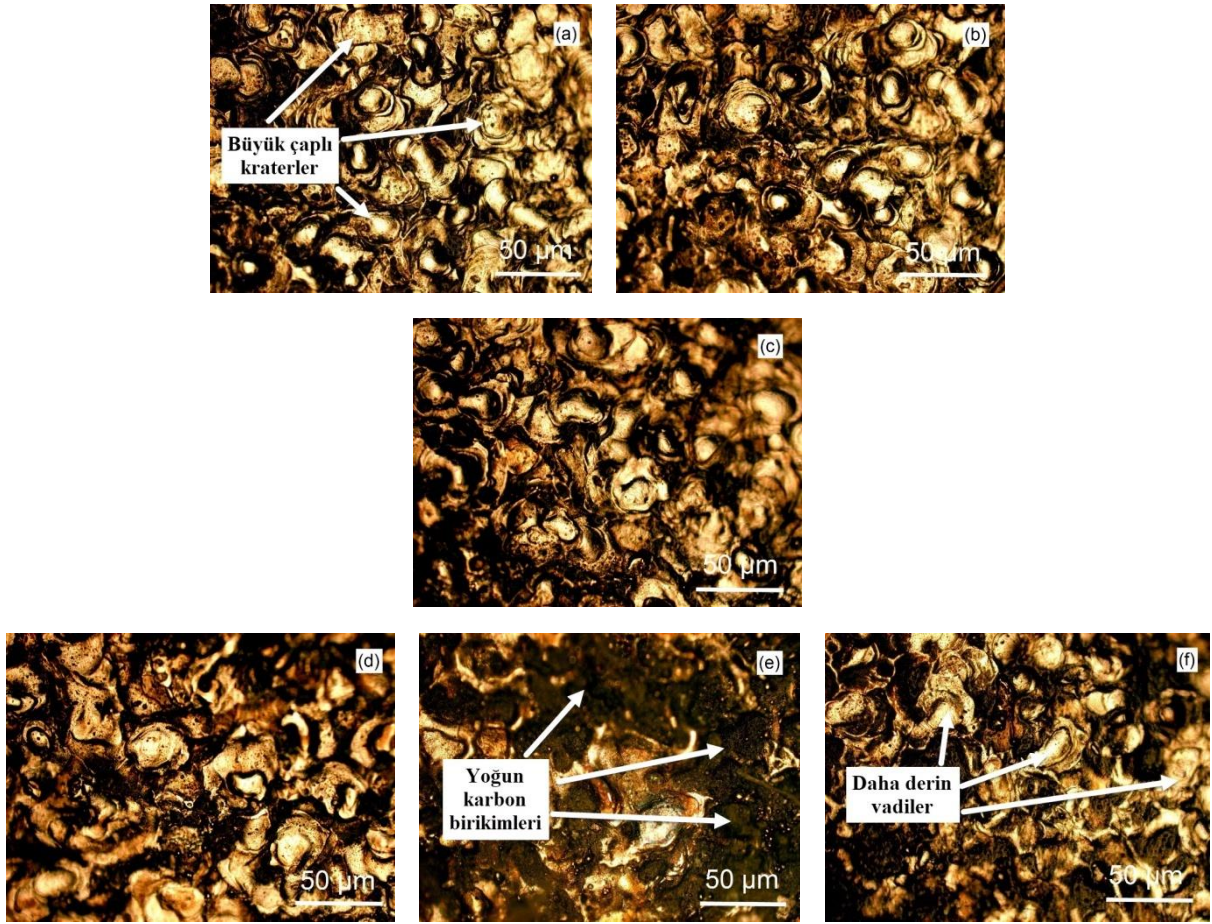
M1, M2 ve M3 işleme tipleriyle işlenmiş yüzeylerin optik mikroskop fotoğrafları EEİ parametreleri (I_d , t_{on} ve t_{off}) açısından kendi aralarında kıyaslandığında, M1 ile işlenmiş yüzeylerde (Şekil 13), M2 ve M3 ile işlenmiş yüzeylere (Şekil 14-15) nazaran daha az yanıklar ve daha sığ vadiler tespit edilmiştir. Özellikle M3 ile işlenmiş yüzeylerde (Şekil 15), yüksek boşalım akımı, yüksek vurum süresi ve düşük bekleme süresi değerleri yüzünden yoğun karbon birikimleri ve derin vadiler görülmüştür.

İşlenmiş yüzeylere yapılan optik mikroskop incelemelerinden, artan boşalım akımı ve vurum süresi değerlerinin yüzey özelliklerini olumsuz yönde etkiledikleri tespit edilmiştir. M3 işleme tipiyle her ne kadar yüksek İİH değerleri elde edilmiş olsa da işlenmiş parçaların yüzey özellikleri bakımından kabul edilebilirliğinin

şüpheli olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun üzerine, EEİ'de kabul edilebilir yüzey pürüzlülüğüne sahip makine parçalarını makul sürelerde (yüksek İİH'de) delebilmek için operasyon stratejisi belirlenmesi gerektiği düşünülmektedir. Bunun için delinecek parçaların geometrik toleransları göz önünde bulundurularak öncelikle kaba işleme (M3), sonra orta işleme (M2) ve en sonunda hassas işleme (M1) yapılmasıyla beklentileri karşılayabilecek makine parçalarının üretilebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 14. M2 işleme tipiyle işlenmiş yüzeyler: a) sabit elektrotla katkısız dielektrikte, b) döner elektrotla katkısız dielektrikte, c) sabit elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, d) döner elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, e) sabit elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, f) döner elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte



Şekil 15. M3 işleme tipiyle işlenmiş yüzeyler: a) sabit elektrotla katkısız dielektrikte, b) döner elektrotla katkısız dielektrikte, c) sabit elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, d) döner elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, e) sabit elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, f) döner elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı konsantrasyonlara sahip TiO₂ tozu katkılı ER100 dielektrik sıvı ve farklı dönüş hızlarında elektrot (dönmeyen ve döner) kullanılarak yapılan EEİ deneyleri sonucunda, İİH, EAH, BA, R_a ve işparçası mikro yapısı gibi EEİ'nin ana performans çıktıları elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmadan çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Hem sabit hem de döner elektrotla EEİ deneylerinde TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) İİH değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde İİH değeri açısından ortalama %30,48'lik bir artış elde edilmiştir. Yine, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %57,03'lük bir işleme hızı artışı sağlanmıştır. TiO₂ tozu katkısı işleme ortamındaki dengeyi sağlayarak işleme esnasındaki boşalım kıvılcımlarının işparçası yüzeyine eşit olarak yayılmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu işleme mekanizması sayesinde TiO₂ tozu katkısının genel olarak İİH değerlerinin artmasına katkı sağladığı keşfedilmiştir. Ayrıca, elektrotu döndürmek İİH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %99,5 artış sağlarken, M2 işleme tipinde ortalama %13,75 ve M3 işleme tipinde ortalama %9,38 oranlarında artışlara olanak sağlamıştır.

TiO₂ tozu katkısıyla hem sabit hem de döner elektrotla yapılan deneylerde, M1 ve M2 işleme tiplerinde elektrot aşınması azalırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte elektrot aşınmasının arttığı sonucuna varılmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan

deneylerde EAH değerinin ortalama %45,81 oranında (M1 için %58,93, M2 için %75,8 ve M3 için %2,71 oranlarında EAH azalması) azaldığı tespit edilmiştir. Fakat, 10 g/l TiO₂ tozu katkısı EAH değerlerini M1 için %89,36 ve M2 için %75,8 oranlarında azaltırken, M3 için %347,45 oranlarında artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, elektrotu döndürmek EAH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %166,50 artış sağlarken M2 işleme tipinde ortalama %106,72 ve M3 işleme tipinde ortalama %24,57 oranlarında artışlara sebep olmuştur.

BA değerlerinin tıpkı EAH değerleri gibi özellikler sergilediği görülmüştür. Sabit elektrotla EEİ deneylerinde, TiO₂ tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde BA değerlerini azaltırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte BA değeri artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde BA değerinin ortalama %89,53 oranında (M1 için %143,81, M2 için %91,18 ve M3 için %33,59 oranlarında BA azalması) azaldığı görülmüştür. 10 g/l TiO₂ tozu katkısı ise BA değerlerini M1 için %276,47 ve M2 için %114,28 oranlarında azaltırken, M3 için %66,55 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Yine, elektrotu döndürmek BA değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %22,87 artış sağlarken M2 işleme tipinde ortalama %45,53 ve M3 işleme tipinde ortalama %10,78 oranlarında artışlara sebep olmuştur.

Yine, hem sabit hem de döner elektrotla EEİ deneylerinde TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde R_a değerini azaltmıştır. Sabit elektrot kullanılarak yapılan EEİ deneylerinde TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) R_a değerlerini azaltmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %5,27, M2 için %8 ve M3 için %2,95 oranlarında azaltmıştır. Yine, 10 g/l TiO₂ tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %8,15, M2 için %15,07 ve M3 için %6,21 oranlarında azalttığı tespit edilmiştir. Döner elektrotla yapılan EEİ deneylerinde ise, TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde R_a değerlerini benzer şekilde azaltmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde R_a değeri için ortalama %7,87'lik bir azalma elde edilmiştir (M1 için %10,41, M2 için %8,85 ve M3 için %4,36 oranlarında azalma). Yine, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %13,04'lük bir R_a değeri düşüşü sağlanmıştır (M1 için %17,82, M2 için %11,76 ve M3 için %9,54 oranlarında azalma).

EEİ'de kabul edilebilir yüzey pürüzlülüğüne sahip makine parçalarını makul sürelerde debilmek için operasyon stratejisi belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bunun için delinecek parçaların geometrik toleransları göz önünde bulundurularak öncelikle kaba işleme (M3), sonra orta işleme (M2) ve en sonunda hassas işleme (M1) yapılmasıyla beklentileri karşılayabilecek makine parçalarının üretilbileceği kanaatine varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nce desteklenmiştir. Proje Numarası: MMF.A3.17.002. ("This work was supported by the Kırşehir Ahi Evran University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: MMF.A3.17.002"). Desteklerinden dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Jadhav, H. P., Mohanty, P. K., & Das, S. (2018). Numerical simulation of multi-spark electric discharge machining analysis for Ti6Al4V alloy drilling. *Materials Today: Proceedings*, 5, 28337–28346.
- [2] Marashi, H., Jafarlou, D. M., Sarhan, A. A. D., & Hamdi, M. (2016). State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications. *Precision Engineering*, 46, 11-13.
- [3] Rajamanickam, S., & Prasanna, J. (2018). TOPSIS on High Aspect Ratio Electric Discharge Machining (EDM) of Ti-6Al-4V using 300 µm brass rotary tube electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 5, 18489-18501.
- [4] Cyril, J., Parvasu, A., Jerald, J., Sumit, K., & Kanagaraj, G. (2017). Experimental investigation on performance of additive mixed dielectric during micro-electric discharge drilling on 316L stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(6), 638-644.

- [5] Kumar, A., Mandal, A., Dixit, A. R., Das, A. K., Kumar, S., & Ranjan, R. (2019). Comparison in the performance of EDM and NPMEDM using Al₂O₃ nanopowder as an impurity in DI water dielectric. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 1327-1339.
- [6] Kliuev, M., Maradia, U., Boccadoro, M., Perez, R., Stirnimann, J., & Wegener, K. (2016). Experimental Study of EDM-Drilling and Shaping of SiSiC and SiC. *Procedia CIRP*, 42, 191-196.
- [7] Kliuev, M., Maradia, U., & Wegener, K. (2018). EDM Drilling of Non-Conducting Materials in Deionised Water. *Procedia CIRP*, 68, 11-16.
- [8] Munz, M., Risto, M., Haas, R., Landfried, R., Kern, F., & Gadow, R. (2013). Machinability of ZTA-TiC ceramics by electrical discharge drilling. *Procedia CIRP*, 6, 77-82.
- [9] Kumar, R., Kumar, A., & Singh, I. (2018). Electric discharge drilling of micro holes in CFRP laminates. *Journal of Materials Processing Tech.*, 259, 150-158.
- [10] Unses, E., & Cogun, C. (2015). Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 61(6), 409-418.
- [11] Kumar, R., & Singh, I. (2019). A modified electrode design for improving process performance of electric discharge drilling. *Journal of Materials Processing Tech.*, 264, 211-219.
- [12] Rahman, S. S., Ashraf, M. Z. I., Bashar, M. S., Kamruzzaman, M., Amin, A. K. M. N., & Hossain, M. M. (2017). Crystallinity, surface morphology, and chemical composition of the recast layer and rutile-TiO₂ formation on Ti-6Al-4V ELI by wire-EDM to enhance biocompatibility. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 93, 3285-3296.
- [13] Rakwal, D., Heamawatanachai, S., Tathireddy, P., Solzbacher, F., & Bamberg, E. (2009). Fabrication of compliant high aspect ratio silicon microelectrode arrays using micro-wire electrical discharge machining. *Microsyst Technol.*, 15(5), 789-797.
- [14] Aliyu, A. A. A., Rani, A. M. A., Ginta, T. L., Rao, T. V. V. L. N., Selvamurugan, N., & Roy, S. (2018). Hydroxyapatite mixed-electro discharge formation of bioceramic Larkargiite (CaZrO₃) on Zr-Cu-Ni-Ti-Be for orthopedic application. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(16), 1734-1744.
- [15] Kumar, R., & Singh, I. (2018). Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool. *Precision Engineering*, 51, 529-535.
- [16] Pragadish, N., & Kumar, M. P. (2015). Surface characteristics analysis of dry EDMed AISI D2 steel using modified tool design. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(4), 1737-1743.
- [17] Govindan, P., & Joshi, S. S. (2010). Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50, 431-443.
- [18] Dhakar, K., & Dvivedi, A. (2017). Experimental Investigation on Near-dry EDM using Glycerin-Air Mixture as Dielectric Medium. *Materials Today: Proceedings*, 4, 5344-5350.
- [19] Dhakar, K., & Dvivedi, A. (2016). Parametric Evaluation on Near-Dry Electric Discharge Machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 413-421.
- [20] Bai, X., Yang, T., & Zhang, Q. (2018). Experimental study on the electrical discharge machining with three-phase flow dielectric medium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 2003-2011.
- [21] Hanash, E. A. H., & Ali, M. Y. (2017). Experimental study of electrical discharge drilling of stainless steel UNS S30400. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 290, 1-8.

- [22] Hourmand, M., Sarhan, A. A. D., & Sayuti, M. (2017). Micro-electrode fabrication processes for micro-EDM drilling and milling: a state-of-the-art review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 91, 1023-1056.
- [23] Nanimina, A. M., Rani, A. M. A., & Ginta, T. L. (2014). Assessment of Powder Mixed EDM: A Review. *MATEC Web of Conferences*, 13, 4018-4023.
- [24] Mondal, G., Surekha, B., & Choudhury, S. D. (2018). Investigation on the influence of different Powder mixed Dielectric in Electric discharge Machining. *Materials Today: Proceedings*, 5, 18281-18286.
- [25] Wang, C., & Qiang, Z. (2019). Comparison of Micro-EDM Characteristics of Inconel 706 between EDM Oil and an Al Powder-Mixed Dielectric. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-11.
- [26] Erdem, O., Çoğun, C., Urtekin, L., Özerkan, H. B., & Usulan, İ. (2016). Toz katkılı ve ısıtılmış dielektriğin elektro erozyon ile işlemede (EEİ) delik delme performansı üzerine etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 531-544.
- [27] Li, C., Xu, X., Li, Y., Tong, H., Ding, S., Kong, Q., Zhao, L., & Ding, J. (2019). Effects of dielectric fluids on surface integrity for the recast layer in high speed EDM drilling of nickel alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 783, 95-102.
- [28] Shard, A., Shikha, D., Gupta, V., & Garg, M. P. (2018). Effect of B4C abrasive mixed into dielectric fluid on electrical discharge machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 554-565.
- [29] Patel, S., Thesiya, D., & Rajurkar, A. (2017). Aluminium powder mixed rotary electric discharge machining (PMEDM) on Inconel 718. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 16(1), 21-30.
- [30] Kuppam, P., Narayanan, S., Oyyaravelu, R., & Balan A. S. S. (2017). Performance Evaluation of Electrode Materials in Electric Discharge Deep Hole Drilling of Inconel 718 Superalloy. *Procedia Engineering*, 174, 53-59.
- [31] Beravala, H., & Pandey, P. M. (2018). Experimental investigations to evaluate the effect of magnetic field on the performance of air and argon gas assisted EDM processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 356-373.
- [32] Sahu, S. K., Jadam, T., Datta, S., & Nandi, G. (2018). Effect of using SiC powder-added dielectric media during electrodischarge machining of Inconel 718 superalloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 330-349.
- [33] Paul, B. K., Sahu, S. K., Jadam, T., Datta, S., Dhupal, D., & Mahapatra, S. S. (2018). Effects of Addition of Copper Powder in the Dielectric Media (EDM Oil) on Electro-Discharge Machining Performance of Inconel 718 Super Alloys. *Materials Today: Proceedings*, 5, 17618-17626.
- [34] Tiwary, A. P., Pradhan, B. B., & Bhattacharyya, B. (2018). Investigation on the effect of dielectrics during micro-electro-discharge machining of Ti-6Al-4V. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 95, 861-874.
- [35] Baseri, H., & Sadeghian, S. (2016). Effects of nanopowder TiO₂-mixed dielectric and rotary tool on EDM. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 83, 519-528.
- [36] Swiercz, R., & Swiercz, D. O. (2019). The Effects of Reduced Graphene Oxide Flakes in the Dielectric on Electrical Discharge Machining. *Nanomaterials*, 9, 335-351.
- [37] Tseng, K. H., Chang, C. Y., Chung, M. Y., & Cheng, T. S. (2017). Fabricating TiO₂ nanocolloids by electric spark discharge method at normal temperature and pressure. *Nanotechnology*, 28, 465701-465710.
- [38] Sindhu, M. K., Nandi, D., & Basak, I. (2018). Electric discharge phenomenon in dielectric and electrolyte medium. *Adv. Manuf.*, 6, 457-464.

- [39] Kou, Z., & Han, F. (2018). On sustainable manufacturing titanium alloy by high-speed EDM milling with moving electric arcs while using water-based dielectric. *Journal of Cleaner Production*, 189, 78-87.
- [40] Srinivas, V. V., Ramanujam, R., & Rajyalakshmi, G. (2018). A Review of Research Scope on Sustainable and Eco-Friendly Electrical Discharge Machining (E-EDM). *Materials Today: Proceedings*, 5, 12525-12533.
- [41] Almancinha, J. A., Lopes, A. M., Rosa, P., & Marafona, J. D. (2018). How Hydrogen Dielectric Strength Forces the Work Voltage in the Electric Discharge Machining. *Micromachines*, 9, 240-251.
- [42] Valaki, J. B., & P.P. Rathod, P. P. (2016). Assessment of operational feasibility of waste vegetable oil based bio-dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 87, 1509-1518.
- [43] Süzgünoğlu, M., & Kayır, Y. (2012). DIN 1.2311 ve 1.2738 kalıp çeliklerinin işlenebilirliği. 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*. 04-05 Ekim, Ankara, Türkiye, 132-142.
- [44] Davis, J. R. (1996). *ASM Specialth Handbook Carbon and Alloy Steels*. ASM International, New York, 731.
- [45] Erdem, O. (2016). *Elektro erozyon ile işlemede döner elektrot kullanılarak delik delmede dielektrik delik delmede dielektrik sıvısına karıştırılan tozların ve ısıtmanın işleme performansına etkisinin araştırılması ve multi fizik simülasyonu*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [46] Nas, E., Argun, K., & Zurnacı, E. (2018). AISI 1.2738 Çeliğinin Elektro-Erozyon Tezgaahında Grafit Elektrot ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 574-581.
- [47] Davis, J. R. (1998). *Metals Handbook 2nd Edition*. ASM International, New York, 2571.
- [48] Nas, E. (2020). Optimization of the EDM machinability of deep and shallow cryogenically treated corrosion-resistant superalloys. *Proc. IMechE. Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, 0(0), 1-16.
- [49] Erdem, O. (2018). Nükleer enerji santrallerinde kullanılan östenitik çeliklerin elektro erozyon ile işleme (EEİ) performansları. *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018)*. November 22-23, Ankara, Turkey, 203-211.
- [50] Tess-San Metal Yüzey İşlem Kimyasalları, 2020. <https://www.tess-san.com.tr/urun/eurolub-edm-er-100/> (26.03.2020).
- [51] Merck, 2020. https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/TitaniumIV-oxide,MDA_CHEM-100808 (26.03.2020).
- [52] Erdem, O., Çoğun, C., Uslan, İ., Urtekin, L., & Özerkan, H. B. (2013). Elektro Erozyon İle İşlemede Döner Elektrot İle Delik Delmede Dielektrik Sıvısına Karıştırılan Tozların Ve Isıtmanın İşleme Performansına Etkisi. *Makine İmalat Teknolojileri Kongresi*. 06-07 Aralık, Bursa, Türkiye, 1-9.
- [53] Erdem, O., Çoğun, C., Urtekin, L., Özerkan, H. B., & Uslan, İ. (2014). Toz Katkılı Dielektrikle Elektro Erozyon İşleme Performansı. *7th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition*. June 24-28, Ankara, Turkey, 1-3.
- [54] Erdem, O. (2018). Gıda Sanayinde Kullanılan AISI304 ve AISI316 Paslanmaz Çeliklerin Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) Performanslarının Araştırılması. *The 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2018)*. 09-11 November, Alanya-Antalya, Turkey, 56-65.

Araştırma Makalesi - Research Article

Düşme Tespit Sistemlerinde Aktivite Sınıfı Sayısının Etkisinin Araştırılması

Sıtkı Kocaoğlu^{1*}

Geliş / Received: 03/04/2020

Revize / Revised: 18/11/2020

Kabul / Accepted: 25/11/2020

ÖZ

Bu çalışmada, yaşlı bireyler için geliştirilen düşme tespit sistemlerinde, makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırıcılarda sınıf sayısının azaltılmasının doğruluk seviyesine katkısı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında internette açık erişime sunulmuş bir veri seti kullanılmış, aktivite ve postür belirlemede sıkça kullanılan öznitelikler çıkarılmış ve *MATLAB Machine Learning Framework*'de bulunan sınıflandırıcıların tümü kullanılarak en başarılı sınıflandırıcının tahlili makine öğrenmesi metriklerine göre yapılmıştır. Sınıf sayısı kademeli olarak azaltılıp başarıya etkisi incelenmiştir. Başlangıç aşamasında sınıf sayısı azaltılmadan yapılan sınıflandırmada en başarılı sınıflandırıcı olarak *Küçük Destek Vektör Makinesi (Cubic SVM)* algoritması belirlenmiştir. Bu algoritmayı kullanarak gerçekleştirilen sınıflandırmada başarı % 96,4 olmuştur. Problemin doğasına da uygun olarak literatürdeki çalışmaların aksine sınıf sayısı 2'ye düşürüldüğünde k en yakın komşuluk (KNN) algoritması ile düşmeler %99,3 oranında doğru şekilde belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Düşme Tespit Sistemi, Makine Öğrenmesi, İyeme Sensörü, Sınıf Sayısı

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: sitki.kocaoglu@klu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-1048-9623>)

Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kırklareli, Türkiye

Investigating the Impact of Activity Class Number in Fall Detection Systems

ABSTRACT

In this study, the contribution of reducing the number of classes in the machine learning based classifiers to the accuracy level of the fall detection systems developed for older individuals is investigated. Within the scope of the study, a public dataset is used and the appropriate data source is determined, the features frequently used in determining the activity and posture are extracted and the analysis of the most successful classifier is made according to the machine learning metrics using all the classifiers in the *MATLAB Machine Learning Framework*. The number of classes is gradually decreased and its effect on success is examined. The classification carried out with the *Cubic Support Vector Machine (Cubic SVM)* algorithm, which is determined as the most successful classifier in the classification without reducing the number of classes at the initial stage, is 96.4%. In accordance with the nature of the problem, contrary to the studies in the literature, when the number of classes is reduced to two, the falls are correctly determined by 99.3% by using k nearest neighbor algorithm.

Keywords- *Fall Detection System, Machine Learning, Accelerometer, Number of Classes*

I. INTRODUCTION

According to the United Nations' World Population Expectations 2019 report, the world population, which was 7.7 billion in mid-2019, will increase to 9.7 billion by 2050, and individuals over 65, now constituting 9% of the population, while in 2050 this will increase to 17%. The Potential Support Rate, that is, the ratio of the number of individuals at the age of working (25-64 years old) to the number of individuals over 65, is expected to fall below 2 by 2050 for the European continent [1]. In 2050, the ratio of elderly individuals to total population will reach at least twice by today. In the report, Turkey is also included in the category of countries with rapidly aging. While the number of individuals over 65 is 7.28 million in our country, it is predicted that it will be 19.5 million in 2050 [2,3] (Figure 1). In addition, due to the rapid participation of women in working life and the decrease in the number of individuals in the family, it is observed that the elderly individuals, whose numbers are increasing rapidly, often live at certain times of the day or completely alone. This situation indicates that additional preventions should be taken for health monitoring and care of the elderly in the coming years.

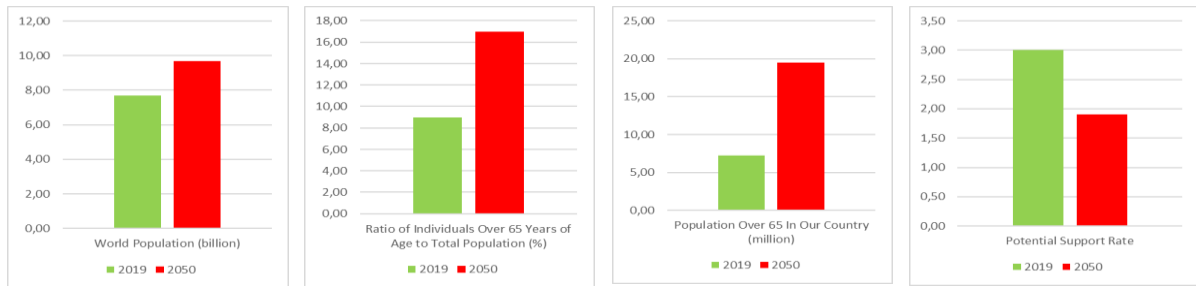


Figure1. Statistical data about aging

The number of falls increases with the biological change that occurs due to the increase in age. Falls are the second most common cause of death in accidental and unintentional injuries worldwide. Approximately 646 thousand people lose their lives in the world as a result of falling, and the most common age group is 65+. As a result of nearly 37 million falls per year, people apply to clinics for medical assistance [4]. It is an important problem for older individuals to fall, especially when they are alone at home. While bone fractures occur in some of the fall cases in elderly individuals, no significant physiological damage occurs in 20% of the falls. However, as a result of the fact that the individual cannot get up of the ground without help, it is seen that his health condition deteriorates due to the long stay on the ground. Statistics show that about half of the elderly who have been lying on the ground for a long time died within 6 months [5]. Although a number of preventions can be taken to prevent elderly individuals from falling in the home, it does not seem possible to significantly reduce the number of falls [6]. For this reason, when elderly individuals fall, it is vital to detect quickly and to provide medical support. Thus, fall detection systems are important components of home care technologies.

Fall detection systems have been one of the subjects of great interest for researchers since 2010. These systems can be examined in 3 main groups as below;

- i. Wearable Sensor Based Fall Detection Systems
- ii. Ambient Sensor and Image Processing Based Fall Detection Systems
- iii. Multimodal Fall Detection Systems

The first prototype of automatic fall detection systems was introduced in 1998 by Williams et al. It was created by using a piezoelectric sensor [7]. The first fall detection system based on image processing was developed by Wu in 2000 based on motion velocity measurement [8]. The first system developed using a wearable sensor is the work of Prado et al. In this study, high frequency accelerations were measured, falls were detected, and data were collected by wireless communication [9]. Also, in 2002, Noury created the first fall detection sensor

by combining the accelerometer, tilt sensor, and vibration sensor, but with the rule-based approach developed, the fall detection success was very low [10]. Health monitoring system developed by Kang et al in 2006 also includes fall detection system. In their study, fall detection was performed using the accelerometer and posture sensor within the sensor structure worn on the wrist, and falls were detected 91.3% accurately [11]. In the study of Nyan et al. in 2006, a multimodal fall detection system was realized for the first time by using a combination of camera and gyroscope [12]. In this study, back and lateral falls were tried to be determined. In their study, as in previous studies, limit values were determined and activities were decided as whether fall or not. With the development of smart phones, it is seen that they are frequently used in fall detection systems. However, it is observed that the fall detection systems realized with the accelerometers found in the phones are able to perform fall detection with lower accuracy compared to other accelerometer-based systems [13]. After the Microsoft Company developed the sensor-camera system called Kinect, fall detection systems were developed by many researchers using it [14].

In the literature, the following components are found in wearable systems; accelerometers, gyroscopes, magnetometers, barometric pressure sensors, pulse measurement sensors, blood pressure measurement sensors, posture measurement combined sensors (AHRS), electromyograms (EMG), electroencephalographs (EEG), and altitude sensors. In the ambient sensor and image processing-based fall detection systems, one or more cameras or ambient sensors are placed in the room where the elderly person is living. Here, falling activity is detected by approaches, such as shape determination, immobility determination, shape change determination, posture determination, and head movement speed determination. As ambient sensors, there are studies using infrared sensors, microphones to detect the sound caused by falling, vibration sensors to detect ground vibration, bio-radar and infrared thermal sensors. In multimodal fall detection systems, the wearable sensor is connected to the body of the elderly and at the same time follow-up is maintained with camera and ambient sensors. The aim is to increase the classification accuracy.

Classification accuracy of fall detection systems is important, but a more important issue is the acceptance by elderly individuals. In particular, cameras in image processing systems are rejected by elderly individuals due to privacy concerns. In addition, one of the important limitations of image processing-based systems is their datasets, which either no furniture is available in the room or little furniture not moved at all. In addition, the ambient light level is kept constant during data collection experiments of image processing-based systems and it is not known to what extent the success of the system will be affected when different values are encountered. In practice, the camera installed in only one room of the house can only detect a fall in that room and in cases where there is more than one person in the room, the risk of falling into blackness increases. Likewise, wearable sensor-based systems should be designed in such a way that they do not discomfort the individual and do not need to be removed during activities of daily living (ADLs).

In the process of developing the fall detection system, a dataset that includes ADLs and fall movements is created. The fact that the dataset accurately reflects the ambient conditions and movement patterns of the elderly individuals is essential to the success of the system. However, since it is not possible to make the fall tests using elderly subjects, the fall tests in all data sets in the literature were carried out with individuals at a young age. This situation causes a significant decrease in the success rate of the system when it is put into practice. It is seen that most of the researchers share the datasets publicly on the internet in order to make them available to other researchers. In addition, many researchers who make image-based fall detection use open access images on the internet sites as datasets [15]. In fall detection systems, activity classification is done based on threshold value, rule-based or machine learning. Threshold value-based systems are generally simple applications that can distinguish a single fall pattern and do not give accurate results when tested in datasets of various realistic falls. The most important problem of rule-based systems is feature constraints. Classification success remains low due to the linear evaluation of a few specific features. In most of the fall detection systems developed today are using deep learning and machine learning algorithms, such as Decision Tree (DT), k Nearest Neighbor (k-NN), Support Vector Machine (SVM) and Naïf Bayes (NB). In these studies, it is seen that the falling pattern diversity and classification success are higher since more features can be used in parallel with each other compared to other methods.

In this study, SisFall dataset, which was made public in 2017, is used [16]. The data are classified with various machine learning algorithms and the contribution of reducing classification diversity to success is investigated. k-NN algorithm with 99.3% accuracy is determined as the most successful method.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Dataset

The dataset used in this study is created using 38 healthy subjects consisting of young and old individuals. Each subject repeated the movements listed in Table 1 five times. The dataset includes 15 different falling movements and 19 types of ADL. In this study, 8 types of falls and 8 types of daily activities are used to reduce the size of the data. The fall classes from F01 to F08 and the ADLs from D01 to D08 are used. During the experiments, a wearable sensor placed in belt of the subjects (Figure 2). This sensor structure contains data from two 3-axis accelerometers and one 3-axis gyroscope at 200 Hz frequency.

Table 1. Activities performed by subjects [16]

Code	Activity	Duration (s)
F01	Fall forward while walking, caused by a slip	15
F02	Fall backward while walking, caused by a slip	15
F03	Lateral fall while walking, caused by a slip	15
F04	Fall forward while walking, caused by a trip	15
F05	Fall forward while jogging, caused by a trip	15
F06	Vertical fall while walking, caused by fainting	15
F07	Fall while walking with damping, caused by fainting	15
F08	Fall forward when trying to get up	15
F09	Lateral fall when trying to get up	15
F10	Fall forward when trying to sit down	15
F11	Fall backward when trying to sit down	15
F12	Lateral fall when trying to sit down	15
F13	Fall forward while sitting, caused by fainting	15
F14	Fall backward while sitting, caused by fainting	15
F15	Lateral fall while sitting, caused by fainting	15
D01	Walking slowly	100
D02	Walking quickly	100
D03	Jogging slowly	100
D04	Jogging quickly	100
D05	Walking upstairs and downstairs slowly	25
D06	Walking upstairs and downstairs quickly	25
D07	Slowly sit and get up in a half-height chair	12
D08	Quickly sit and get up in a half-height chair	12
D09	Slowly sit and get up in a low-height chair	12
D10	Quickly sit and get up in a low-height chair	12
D11	Sitting, trying to get up, and collapse into a chair	12
D12	Sitting, lying slowly, wait a moment, and sit again	12
D13	Sitting, lying quickly, wait a moment, and sit again	12
D14	Changing position while lying (back-lateral-back)	12
D15	Standing, slowly bending at knees, and getting up	12
D16	Standing, slowly bending w/o knees, and getting up	12
D17	Standing, get into and get out of a car	25
D18	Stumble while walking	12
D19	Gently jump without falling (to reach a high object)	12



Figure 2. Sensor placement [16]

B. Feature Extraction

The features used frequently in the activity and posture determination studies in the literature are determined and calculated. The features used are shown in Table 2.

Table 2. Features

Feature No	Feature	Equation / Definition	Feature No	Feature	Equation / Definition
1	Mean	$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	7	Minimum	Min. term of data
2	Standard deviation	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$	8	Kurtosis	$g_2 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$
3	Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2$	9	Skewness	$g_1 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$
4	Sum	$s = \sum_{i=1}^N x_i$	10	Band power	Average power of data
5	Median	Midterm of data	11	Root mean square	$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$
6	Maximum	Max. term of data			

C. Classification

Classification is made by using MATLAB Machine Learning Framework. The data is separated as 70% train, 30% test, and 10-folds cross validation is selected. Classification experiments are carried out in 3 different ways. First of all, the movements in 16 different classes were tried to be determined. In the second approach, falls are grouped in a single class and ADLs are classified separately. Finally, only 2 classes are created and classified as falls and ADLs. When evaluating the performance of the system in terms of machine learning metrics, recall, precision, and F-score are calculated. Four important evaluation metrics are calculated as follows using number of true positives (TP), number of false positives (FP), number of false negatives (FN), and number of true negatives (TN).

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$F - score = 2 \times \frac{Recall \times Precision}{Recall + Precision} \quad (3)$$

III. RESULTS

A. 16 Class Approach

The aim in this approach is to determine all the falling movements with their directions and all ADLs with their varieties during daily life. Classification accuracy is 96.4% due to the high number of classes here. The most successful algorithm in this approach is cubic SVM (Figure 3). Performance parameters are presented in Table 3.

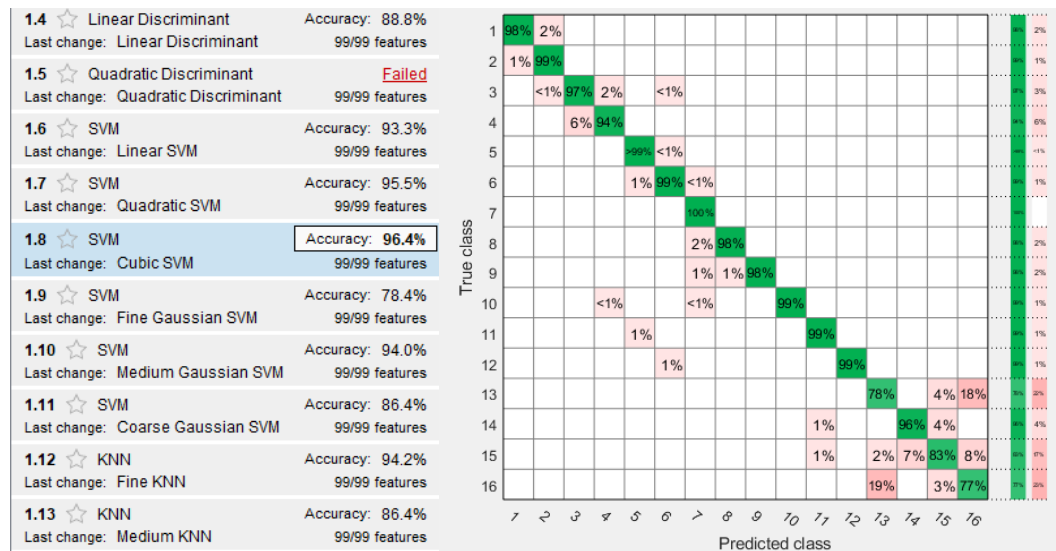


Figure 3. 11 class approach results

Table 3. Performance metrics of 11 class approach

	1	2	3	4	5	6	7	8	All Falls	9	10	11	12	13	14	15	16	All ADL's
Recall	0,99	0,99	0,95	0,98	0,99	0,99	0,96	0,99	0,99	1	1	0,99	1,00	0,79	0,93	0,89	0,69	1
Precision	0,98	0,99	0,97	0,94	0,99	0,99	1	0,99	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,78	0,96	0,83	0,77	0,99
F-score	0,98	0,99	0,96	0,96	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,78	0,94	0,86	0,73	0,99

By the detailed examination of this approach in Table 3, the system is successful in classification according to the types of falls. However, when Figure 3 is examined, it can be seen that generally the misclassified falls are incorrectly recorded as another type of fall. Thus, examining all of the falls as a single group will increase the classification success. The falling direction during the use of the system in daily life is not important anyway. When the "All Falls" column is examined in Table 3, the 99% F-score value indicates that the falls are actually accurately distinguished. In fact, the samples that are dropped and recorded as ADL are only in the "walking" classes 9 and 10 and "jogging" classes 11 and 12.

Similarly, when ADLs are examined, the fact that the F-score value in the "All ADLs" column is 99% shows that ADLs can be easily separated from the falls. There is not any observation with true class ADL and misclassified as fall.

B. 9 Class Approach

Due to the complexity of distinguishing the falls from each other, all falls have been brought into a single class. In this way, it is seen in Figure 4 that the overall classification success increased from 96.4% to 96.9%. The cubic SVM which is the most successful model in the previous approach is the most successful classifier in this approach too.

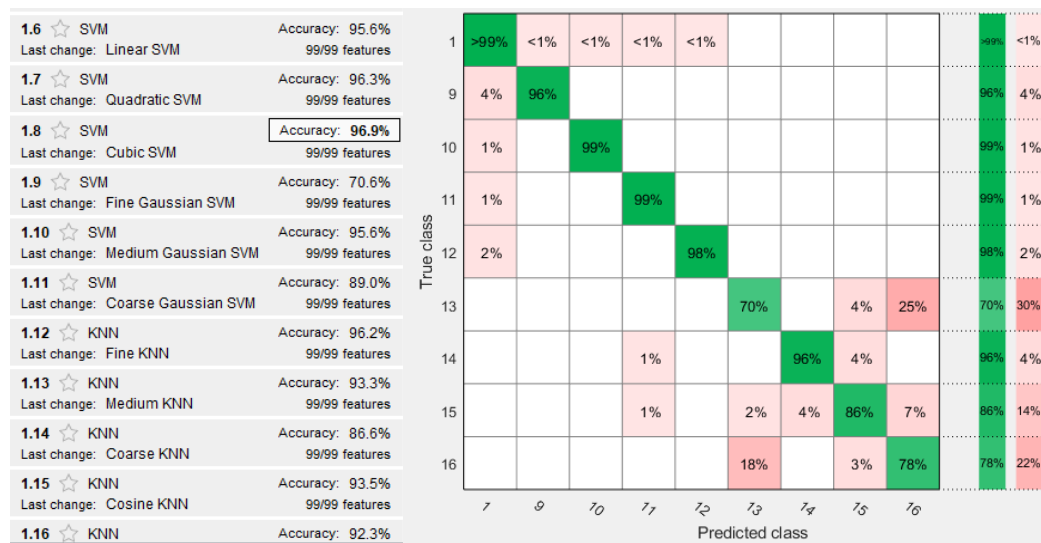


Figure4. 6 class approach results

Table 4. Performance metrics of 6 class approach

	Falls	9	10	11	12	13	14	15	16	All ADL's
Recall	1	0,99	1	0,99	1	0,78	0,96	0,88	0,71	0,99
Precision	1	0,96	0,99	0,99	0,99	0,70	0,96	0,86	0,78	0,99
F-score	1	0,97	0,99	0,99	0,99	0,74	0,96	0,87	0,74	0,99

When the complexity matrix given in Figure 4 is examined, it can be seen that nearly 100% of the falls can be classified correctly and recorded as falls. But ADL classification success is not very good. The rates of ADLs registered in the fall class are not high. Even the class 13 "Walking upstairs and downstairs slowly" and class 16 "Quickly sit and get up in a half-height chair" are the most problematic classes and these are reducing overall accuracy.

C. 2 Class Approach

In this section, movements are divided into 2 classes as 1: Falls and 2: ADLs. Thus, the main goal is to determine the fall movements as accurately as possible. When Figure 5 is examined, it is seen that the theory has found a response. The success rate increased to 99.3%. The most successful classifier is fine k-NN.

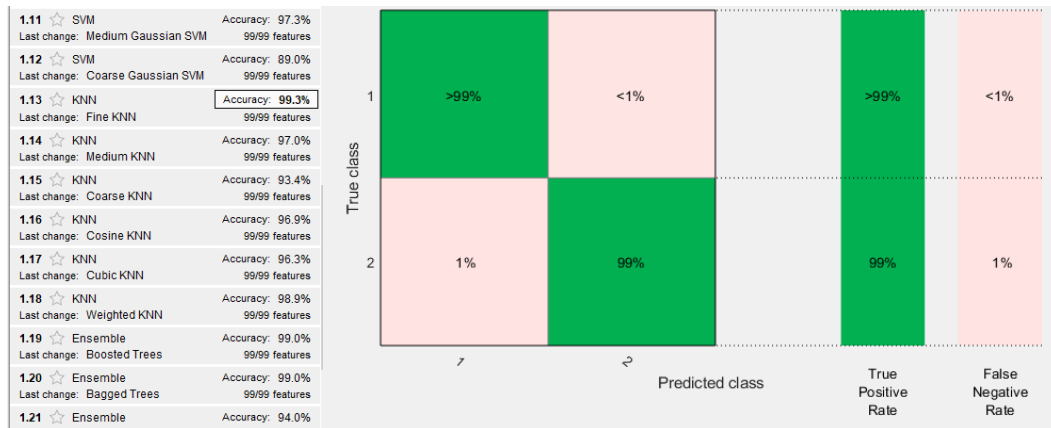


Figure 5. 2 class approach results

Table 5. Performance metrics of 2 class approach

General	
Recall	0,994
Precision	0,996
F-score	0,995

The developed model is exported as a compact model and tested with test data that is separated in the beginning and the system had not met before. The classification accuracy that arises here is to confirm the study, only 0.6% of the data is classified incorrectly.

IV. CONCLUSION

Within the scope of the study, it is aimed to develop a suitable machine learning model to be used in fall detection for elderly individuals. The aim is to propose a system that is suitable for use both in the home and outside. A system design is aimed with high accuracy and low cost, which elderly individuals will not refuse to use in daily life. Within the scope of the study, a very high classification success could be created by reducing the number of activity classes. The falls in daily life are very diverse. Falls occur as a result of complex interactions of risk factors. It is known that biological, behavioral, environmental and socio-economic factors have effects on the fall. Even when it is analyzed only by the age and gender of the individuals, it is seen that the fall types are different. For this reason, the systems that can detect all falls regardless of their direction and shape, rather than the systems that distinguish between falls in a certain way and direction, overlap with real life.

V. LIMITS AND FUTURE WORK

Falls are very rare movements compared to ADLs due to their nature. For this reason, it is nearly impossible to record by a sensor is placed on a subject and it falls naturally. The falls in the dataset used in this study are also artificial falls. Therefore, it may not be able to imitate natural falls very well. In addition, while creating dataset, falling measurements were taken only from young individuals and it is known that the activity dynamics of older individuals and young individuals are very different. However, due to ethical standards, it is not possible to do falling tests with elderly people.

In addition, while selecting the features, only the frequently used features in the literature are taken. The effect of the features on the classification success has not been investigated. The main purpose here is to observe the effect of the number of classes on success without any other factors. It is clear, however, that the success achieved shows that such improvements are not required.

REFERENCES

- [1] United Nations. (2019). *World Population Prospects 2019*. <https://population.un.org/wpp/>
- [2] Turkish Republic Ministry of Family and Social Policies. (2013). *Dormitory and elderly aging national action plan implementation program in Turkey*. https://www.tatd.org.tr/uploads/tbl_calisma_grubu_belgeleri/5bdc0c422b9e3_tbl_calisma_grubu_belgeleri_2018113514.pdf
- [3] United Nations. (2019). *World Population Ageing 2019*. <https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2019-Report.pdf>
- [4] World Health Organization. (2018). *Falls*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls>
- [5] Wild, D., Nayak, U.S.L., Isaacs B. (1981). How dangerous are falls in old people at home?. *British Medical Journal (Clinical Research Edition)*, 282, 266–268.
- [6] World Health Organization. (2007). *Global report on falls Prevention in older Age*. https://www.who.int/ageing/publications/Falls_prevention7March.pdf
- [7] Williams, G., Doughty, K., Cameron, K., Bradley, D.A. (1998). A Smart Fall & Activity Monitor for Telecare Applications. *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE* 3, 1151-1154.
- [8] Wu, G. (2000). Distinguishing fall activities from normal activities by velocity characteristics. *Journal of Biomechanics*. 33:1497–1500.
- [9] Prado, M., Reina-Tosina, J., Roa, L. (2002). Distributed intelligent architecture for falling detection and physical activity analysis in the elderly. *Proceedings of 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*; 3, 1910–1911.
- [10] Noury, N. (2002). A smart sensor for the remote follow up of activity and fall detection of the elderly. *Proceedings of 2nd Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology*.314–317.
- [11] Kang, J.M., Yoo, T., Kim, H. C. (2006). A wrist-worn integrated health monitoring instrument with a tele-reporting device for telemedicine and telecare. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 55:1655–1661.
- [12] Nyan, M. N., Tay, F. E. H., Tan, A.W.Y., Seah K. H. W. Distinguishing fall activities from normal activities by angular rate characteristics and high-speed camera characterization. *Medical Engineering and Physics*. 28, 842–849.
- [13] Lee, R. Y. W., Carlisle A. J. (2011). Detection of falls using accelerometers and mobile phone technology. *Age Ageing*. 40, 690–696.
- [14] Han, J., Shao, L., Xu, D., Shotton, J. (2013). Enhanced computer vision with Microsoft Kinect sensor: A review. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 43, 1318–1334.
- [15] Kyriakopoulos, G., Ntanos, S., Anagnostopoulos, T., Tsotsolas, N., Salmon, I., Ntalianis, K. Internet of Things (IoT) -Enabled Elderly Fall Verification , Exploiting Temporal Inference Models in. Smart Homes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17, 1–14.
- [16] Sucerquia, A., López, J. D., Vargas-Bonilla, J. F. (2017). SisFall: A fall and movement dataset. *Sensors (Switzerland)*.17, 1-14.

Araştırma Makalesi- Research Article

Akarsu Köprülerinin HEC-RAS Programı ile Hidrolik Analizi: Fidanlık Köprüsü Örneği

Nuri Yılmaz^{1*}, Hasan Bozkurt², Yıldırım Bayazıt³

Geliş / Received: 27/04/2020

Revize / Revised: 24/06/2020

Kabul / Accepted: 02/07/2020

ÖZ

Dünyada hızla artan insan nüfusu sonucu oluşan plansız kentleşme ve iklim değişiklikleri sebebiyle meteorolojik kaynaklı doğal afet olayları oldukça artmıştır. Bu doğal afetlerin en önemlilerinden biri taşkınlardır. Taşkınlar, can ve mal kayıplarına neden olarak sosyal ve ekonomik olarak zararlar vermektedirler. Meydana gelen taşkınlarda akarsu üzerinde bulunan su yapılarının özellikleri oldukça önem arz etmektedir. Taşkınların yıkıcı etkisini artıran en önemli su yapılarından bir tanesi iyi tasarlanmamış olan akarsu köprüleridir. Akarsu üzerinde bulunan ve hidrolik açıdan iyi tasarlanmamış bir köprü taşkın şiddetini daha da artırmakta ve yıkılma tehlikesiyle karşı karşıya kalarak insanların can ve mal güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Geçmişte akarsular üzerine yapılan köprülerin statik açıdan uygunlukları test edilirken günümüzde hidrolik açıdan güvenilirliği de test edilerek daha güvenli köprüler yapılmaktadır. Bu çalışmada Eskişehir Orman Fidanlık bölgesine yapılmış olan bir köprünün 50 yıllık ve 100 yıllık taşkın debilerine karşı güvenilirliği ArcGIS ve HEC-GeoRAS ile modellenerek HEC-RAS ile test edilerek yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Taşkın, Köprüler, HEC-RAS, Doğal Afet

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: nuriyilmaz@dsi.gov.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2226-5662>)

DSİ 31. Şube Müdürlüğü, DSİ III. Bölge Müdürlüğü, Odunpazarı, Eskişehir

²İletişim: hasan.bozkurt@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7539-8285>)

İnşaat Müh. Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

³İletişim: yildirim.bayazit@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8699-4741>)

İnşaat Müh. Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Gülümbe Kampüsü, Merkez, Bilecik

Hydraulic Analysis of River Bridges with HEC-RAS Software: Example of Fidanlık Bridge

ABSTRACT

Due to the unplanned urbanization and climate changes caused by the rapidly increasing human population in the world, natural disasters caused by meteorological conditions have increased considerably. One of the most important of these natural disasters is floods. Floods cause social and economic damage by causing loss of life and property. In the floods that occur, the features of the water structures on the river are very important. One of the most important water structures that increase the destructive effect of floods are the river bridges that are not well designed. A bridge on the river, which is not hydraulically designed well, increases the severity of flooding and endangers the safety of people and property by facing collapse. While the static suitability of the bridges built on rivers in the past was tested, nowadays hydraulic reliability is tested and safer bridges are built. In this study, the reliability of a bridge constructed in the Eskişehir Forest Fidanlık region against 50 years and 100 years of flood flows was modeled with ArcGIS and HEC-GeoRAS and tested and interpreted with HEC-RAS.

Keywords- *Flood, Bridges, HEC-RAS, Natural Disaster*

I. GİRİŞ

Akarsu köprüleri, insanların uygarlığı boyunca geçmişten günümüze ulaşım ağlarının en önemli yapılarındandır. Köprülere insan, taşıt, deprem, rüzgâr, taşkın anındaki hidrolik kuvvet ve akarsuda sürüklenen malzemenin etki etmesi gibi birçok farklı yük parametresi etki etmektedir. Bu etkilerin karşılanarak insanların can ve mal güvenliğinin sağlanabilmesi için köprülerin statik ve hidrolik açıdan iyi bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Köprü tasarımına ait yük değerleri, köprü üzerine etki eden kuvvetler sonucu aşılırsa köprü hasar görebilir veya yıkılabilir. Akarsu köprülerinde meydana gelen hasar ve yıkılmaların nedenleri incelendiğinde ise ilk sırada hidrolik etkenler gelmektedir. Taşkın anında hidrolik açıdan iyi tasarlanmamış bir akarsu köprüsü ayaklarında veya tabliyesinde meydana gelen hasarlar neticesinde zarar görmekte veya yıkılmaktadır [1]. Köprülerin yapıldığı yerdeki akarsuyun hidrolojik özellikleri, gelebilecek taşkın debileri, akarsuyun taşıdığı malzeme miktarı ve bölgenin topoğrafik özellikleri de iyi bir şekilde irdelenerek güvenli köprü tasarımları yapılmalıdır. Yapısal olarak iyi bir şekilde analiz edilmiş bir köprüde, köprünün taşkın anında gelebilecek debilerdeki davranışının da bilinmesi köprü tasarımını tamamlayan kriterlerindedir [2].

HEC-RAS programı ile akarsu ve havzaların taşkın risk analizleri bilgisayar ortamında yapılarak çıkacak problemler önceden analiz edilebilmektedir. Bülbül ve Demirel [3], Ovacuma bölgesinde Ova Çayında bulunan Akkışla köprüsünde taşkın sırasında oluşabilecek kabarmaları HEC-RAS programı ile inceleyerek alınacak önlemleri belirtmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda 500 yıllık feyzan debisinin köprüyü aştığını görülmüştür. Elde edilen taşkın risk haritaları ile alınabilecek önlemler analiz edilmiş ve en sağlıklı yöntemin akarsu dere yatağında yarma işlemini yaparak yatağı genişletmek olduğu kararlaştırılmıştır. Proje mühendisinin havza çalışmalarında ve su yapısı tasarımlarında bulunurken bölgenin taşkın risk haritasını oluşturarak çalışmasının ileride çıkabilecek aksaklıkları azalttığı, ekonomik sonuçlar doğurduğu görülmüştür. Bunun sonucunda insanların can ve mal güvenliği için daha sağlıklı tasarımlar yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Doğu ve Yıldız [4], Kırıkkale ili içerisinde geçen Kızılırmak nehrinin yan kolu olan Çoruhözü deresinin şehir içerisinde geçen ve DSİ tarafından ıslah edilen 8 km.'lik beton taşkın kanalını incelemişlerdir. Bu kanalın 500 ve 100 yıllık taşkın debilerindeki güvenilirliği HEC-RAS programı ile test edilmiş ve yorumlanmıştır. Yeni tarihli yapılan analizler sonucunda kanal kesitinin taşkın debilerini karşılama da yeterli olmadığı görülmüştür. Su yapıları tasarım ve uygulama aşamasında yeni tarihli yağış verilerin elde edilerek tasarım yapılmasının öneminden bahsedilmiştir. Ayrıca mevcut su yapılarının güncel yağış verilerindeki durumunun analizinin önemi belirtilmiştir. Efe ve Önen [5], Batman Çayı üzerinde bulunan Yeni Malabadi Köprüsü ve Diyarbakır – Batman Karayolunda ulaşımı sağlayan köprüler arasındaki kesimlere ait taşkın analizlerini HEC-RAS programı ile yaparak çözüm önerileri sunmuşlardır. Batman Çayının bu kesiminde yapılan analizler sonucu Çayın bu kesiminde eğimin az, menderesler yaparak akması ve akarsu yatağının geniş olmasına rağmen akarsu kesitinin taşkın debisini karşılamakta yetersiz kaldığı görülmüştür. Bölgenin taşkın tehlikesi altında olduğu derenin ıslah edilmesinin gerekliliği belirtilerek bölgeye yapılacak barajın biran evvel bitirilmesi gerektiği bu sayede tehlikenin ortadan kalkacağı konuları belirtilmiştir. Ercan ve ark.[6], Kahramanmaraş ilinin, On iki Şubat ilçe merkezinde bulunan mahalleleri taşkın riskinden korumak için yapılan kuşaklama kanalı projesinin uygunluğunu HEC-RAS programı ile analiz ederek Mockus ve rasyonel metot ile uyumluluklarını test ederek yorumlamışlardır. On iki Şubat ilçesinde bulunan Domuz deresinde yaşanan taşkınlar sonucu dere çevresindeki mahallelerde taşkınlar yaşanmıştır. Bunun sonucunda dere üzerine DSİ tarafından kuşaklama kanalları yapılmış ve bölgenin taşkın riski azaltılmak istenmiştir. Dere üzerine yapılan kuşaklama kanallarının taşkın risk analizleri ayrıca HEC-RAS ile test edilmiş ve sonuçların birbirine çok yakın çıktığı görülmüştür. Karaca ve ark.[7], Sivas'ın Suşehri ve Koyulhisar ilçelerinden geçen Kelkit Çayı'nın bu kısımlardaki taşkın risk haritaları oluşturularak, taşkın oluşturacağı etkiler analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucu Kelkit çayının bu bölgesinde bulunan şehirlerarası otoyollar ve verimli tarım arazilerin taşkın riski altında olduğu görülmüş, alınabilecek önlemler ve analizlerin daha sağlıklı yapılabilmesi için önerilerde bulunulmuştur. Özdemir [8], Balıkesir Havran Çayında Oldukça fazla taşkın meydana geldiği bu nedenle çay üzerine taşkın önlemek için baraj ve birçok su yapısı yapıldığı, yapılan bu yapıların uygunluğu ve bölgenin taşkın risk haritalarının HEC-RAS programı ile çıkarılarak yorumlanması amacıyla bir çalışma yapmıştır. Yapılan analizler sonucu Havran Çayı üzerine yapılan su yapılarının Havran ilçesini korusa dahi bölge halkının geçim kaynağı olan tarım arazilerinin tehlikede olduğu görülmüştür. Bu duruma neden olarak Havran Çayına yapılan barajdan sonra katılan yan derelerin etkisinin oldukça fazla olduğu görülmüş ve alınması gereken önlemler belirtilmiştir. Ayrıca HEC-RAS ve HEC-GeoRAS ile yapılan akarsu analizlerinin önemini gördüğü vurgulanmıştır. Seçilir [9], tarafından akarsu köprü ayaklarında oluşabilecek kabarmaların hesabında Biery,

Delleur ve Polinomial yaklaşımları laboratuvar ortamında bulunan sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda akarsu köprülerinde maksimum su kabarma yüksekliği için eliptik şeklinde açıklığı bulunan akarsu köprülerinde Biery ve Delleur yöntemlerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Dikdörtgen açıklıklı köprülerde Polinomial yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği, dairesel açıklıklı köprülerde de her iki yöntemde benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Taş ve ark.[10], Afyon'da bulunan Akar çayın alt havzasında farklı dönüş aralıklarında oluşabilecek taşkın debilerindeki su seviyeleri ve su altında kalma tehlikesi yaşayacak yerlerin HEC-RAS programı kullanılarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda taşkın riskine maruz kalacak alanlar belirlenerek bu alanlarda alınacak önlemler ve tavsiyeler belirtilmiştir. Akarsuyun çevresinin yeşil alan ve park olarak tasarlanması, taşkın riski altındaki evlerde taşkın riskine karşı önlemler alınması ve akarsuyun yan kollarının da ayrıca analiz edilmesi önerilen konulardır. Üyükluoğlu ve ark.[11], Manavgat ilçesi, Ilıca Deresinin taşkın risk analizi yapılarak bölgede bulunan tarım arazileri, yerleşim alanları ve su yapılarının güvenliği HEC-RAS programı ile test edilerek yorumlanmıştır. Ilıca deresi üzerinde bulunan su yapılarından bazılarının Q_{500} taşkın debisinde yetersiz kaldığı görülmüştür. Bölgede bulunan turistik oteller ve tarım arazileri düşünülerek akarsu kesitinde alınacak önlemler önerilmiştir. Ayrıca akarsuyun denize döküldüğü noktada da önlemler alınması gerektiği, akarsuyun konumu sebebiyle turistik bir noktada olması sebebiyle yapılacak tasarımların bu durum da dikkate alınarak yapılması gerektiği önerilmiştir.

Bu çalışmada Eskişehir Orman Fidanlık bölgesinde, Porsuk Çayı üzerine DSİ tarafından yapılmış olan Fidanlık Köprüsünün yapısal ve hidrolik açıdan güvenliğini, yukarıda bahsedilen sebeplere göre ve yapılmış olan benzer akademik çalışmaları da dikkate alarak yapılmış olan tasarımının uygunluğunun ve köprüünün güvenliğinin test edilmesi ve değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda yapımı tamamlanan köprüünün sadece yapısal olarak güvenilirliği değil, aynı zamanda hidrolik etkenler açısından da güvenilirliği test edilmiş olacaktır. Çalışmada akarsu köprüsünün 50 ve 100 yıllık taşkın debilerindeki davranışı incelenerek, köprüünün hidrolik açıdan güvenilirliği ArcGIS ve HEC-GeoRAS programı ile modellenmiş ve HEC-RAS paket programı yardımıyla analiz edilerek yorumlanmıştır.

II. ÇALIŞMA ALANI

Şekil 1'de Fidanlık Köprüsünün yeri ve arazinin uydu görüntüsü verilmiştir. Uydu görüntüsünde görüldüğü gibi köprüünün yapılacağı yerin karşısında bulunan fidanlık alanına ulaşım akarsu üzerinde köprü bulunmadığı için Kütahya yolu üzerinden yaklaşık 3,5 - 4 km. daha fazla yol gidilmesi gerekmektedir. Ayrıca araziler arasında iş ve tarım makinesi geçişleri gerektiği için Kütahya yolunun kullanılarak ulaşımın sağlanması tehlikeli olmaktadır. Bu nedenle köprüünün yapılması planlanmıştır. DSİ 3. Bölge Müdürlüğü, Sakarya havzası master planları kapsamında Porsuk alt havzası taşkın etüt master plan raporu hazırlamıştır. Bu raporda köprüünün memba kısmında kalan havzaların taşkın büyüklükleri DSİ Sentetik metoda göre hesaplanarak köprüünün yapılacağı yere süperpoze edilmiştir. Buna göre köprüünün konumlandırıldığı yerdeki taşkın debileri $Q_{50}=139,58$ m^3/s , $Q_{100}=211,40$ m^3/s olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1. Köprü yerine ait uydu görüntüsü

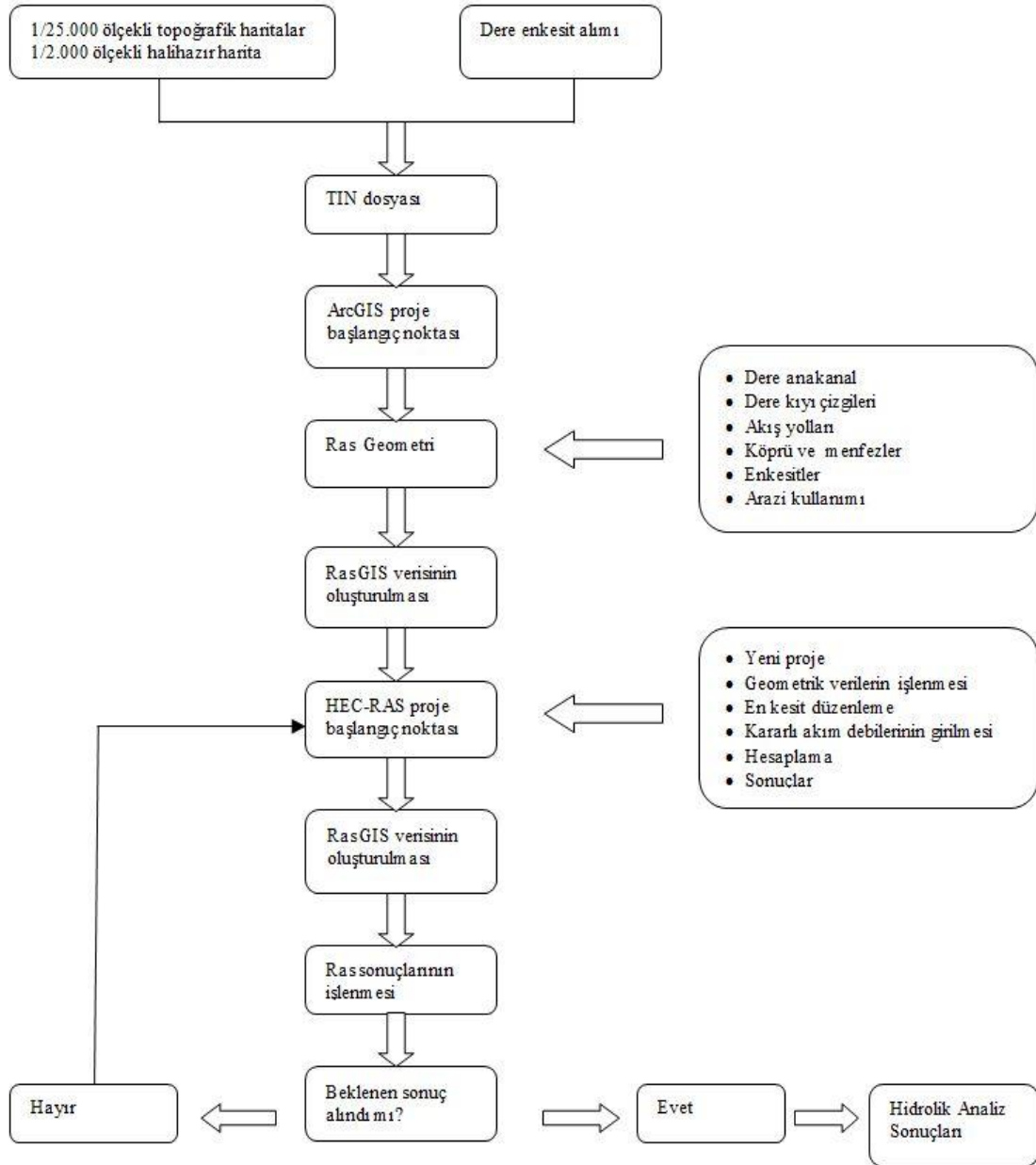
Köprü'nün projesinde tabliye yüksekliği Q_{100} su seviyesine, 1,5 metre de hava payı eklenmesi ile tasarlanmıştır. Arazi çalışmaları akarsuyun her iki sahilinde de köprü ayaklarının konumlandırılacağı noktada sağlam zemin bulunmazsa 25 metre, sağlam zemine ulaşılır ise 5 metre sondaj yapımı uygun görülmüştür. Arazide harita alımları yapılarak köprü'nün tasarımı ve konumu belirlenerek en uygun yere konulmuştur. Köprü'nün tek açıklıkla geçilerek orta ayak bulunmaması kararına varılarak yapılmıştır. Köprü'nün mansabından bir görüntü Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Köprü'nün arazideki görüntüsü

III. YÖNTEM

Bu çalışmada 1/25.000 ölçekli topoğrafik yükseklik haritaları (Harita Genel Müdürlüğü ve DSİ 3. Bölge Müdürlüğü) kullanılarak sayısal yükseklik modeli (DEM) oluşturulmuştur. Daha sonra köprü'nün bulunduğu bölgeye ait TIN (Triangulated Irregular Network) arazi modeli ArcGIS programı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan TIN modeli üzerinde geometrik veriler (akarsu, akarsu kıyı çizgisi, akış yolları, en kesitler, köprü'nün yeri) HEC-GeoRAS yardımıyla oluşturulmuştur. Daha sonra TIN üzerine akarsuya ait işlenmiş olan geometrik veriler HEC-RAS programına aktarılarak burada akarsu ve köprüye ait sayısal veriler girilerek köprü'nün taşkın anındaki analizi yapılmıştır. Analiz yapımına ait işlem basamakları Şekil 3'de ayrıntılı olarak gösterilmiş ve aşağıda sırasıyla anlatılmıştır.



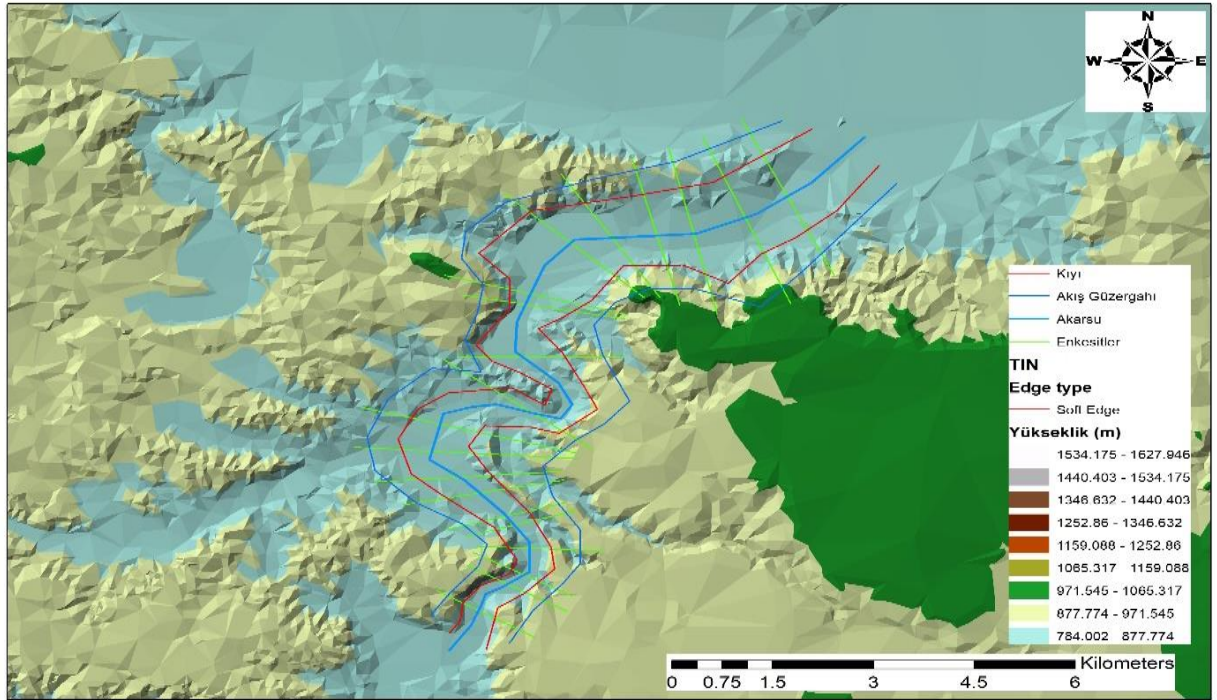
Şekil 3.Çalışmada uygulanan yöntemin iş akış şeması

A. Geometrik Verilerin İşlenmesi

Akarsular üzerinde bulunan su yapıları ve akarsuya ait hidrolik modeller yapabilmek için akarsuya ait geometrik verilerinin girilmesi gereklidir.

Çalışmada köprünün bulunduğu bölgeye ait TIN haritasını oluşturduktan sonra Porsuk Çayı üzerine akış güzergâhı çizerek, akarsu sağ ve sol sahilindeki taşkın alanlarını ve akarsuya ait kıyı sınırları çizilmiştir. Köprünün memba ve mansabında toplam 20 adet kesit çizgisi oluşturulmuştur. Bu kesitlerin 10 tanesi köprünün memba tarafından, 10 tanesi ise mansap tarafından alınmıştır. Çalışmada incelenen akarsu güzergâhının kısa olması en kesit sayısının 20 adetle analiz için yeterli kesitleri sağlayacağı düşünülerek oluşturulmuştur. Ayrıca güzergâh boyunca kesit sayısının artırılması kesit çizgileri arasındaki mesafeyi kısaltacağından menderesli

yapıdaki akarsuyu güzergahında kesitler arasında çakışma problemi yaratabileceği düşünülmüştür. Kesit sayısının gerektiğinden fazla olması durumu çakışma sorunları yaratabilirken gerektiğinden az olması durumunda ise akarsu kesiti yeteri kadar tanımlanamayarak su yüzeyi profillerinin oluşmasında hatalı değerler çıkarabilmektedir. En kesit çizimi yapılırken çizimlerin membadan mansaba doğru olmasına dikkat edilmiştir. Şekil 4’de HEC-GeoRAS yardımıyla oluşturulmuş olan 10’ar adet en kesit, akış güzergâhı ve kıyı çizimleri gösterilmiştir. En kesitler alınırken akarsuyu dik bir şekilde kesmesine, soldan sağa doğru çizilmesine ve çizilen akarsu kıyı, taşkın çizgilerinin hepsini birden içerisine alacak şekilde çizilmesine dikkat edilmiştir. Oluşturulan geometrik veriler HEC-GeoRAS ile TIN haritasının üzerine işlenerek Export edilerek HEC-RAS’a verilerin aktarılacağı sdf uzantılı bir veri dosyası oluşturulmuştur.



Şekil 4. HEC-GeoRAS ile çizilen enkesitler

B. Sayısal Verilerin İşlenmesi

HEC-RAS programı, ArcGIS programıyla beraber çalışarak uydu görüntülerini işleyerek çalışabilen grafik tabanlı ve kullanımı rahat olan bir yazılımdır. Ayrıca HEC-RAS tek boyutlu, sürekli akımlara ait su yüzeylerinin hesaplandığı ve süreksiz akımlara ait modellemelerin yapılabildiği, veri saklama ve yönetim kapasitesine sahip bir hidrolik yazılım programıdır[12].

HEC-RAS programı içerisinde bazı su yapılarına ve köprü tasarımına ait sayısal verilerin girilebilmesi için ayrıca bir sekme bulunmaktadır. Programın içerisine Arc-GIS ve HEC-GeoRAS ile oluşturularak kaydedilmiş olan sdf uzantılı dosya çağrılarak köprünün ve bulunduğu noktanın memba ve mansabına ait sayısal veriler Şekil 5’te gösterildiği gibi programa girilmiştir. Burada Upstream (mema) tarafı, Downstream (mansap) ise tarafına ait köprünün konum verileridir. Böylelikle oluşturulan TINverisi içerisine akarsu köprüsünün sayısal verileri işlenmiştir.

Deck/Roadway Data Editor

Distance	Width	Weir Coef
23.5	9.	1.4

Clear Del Row Ins Row Copy US to DS

Upstream				Downstream		
	Station	high chord	low chord	Station	high chord	low chord
1	0	875	873	0	875	873
2	900	875	873	900	875	873
3	950	875	873	950	875	873
4	1500	875	873	1500	875	873
5	2000	875	873	2000	875	873
6	2921.14	875	873	2921.14	875	873
7						
8						

U.S Embankment SS: 0 D.S Embankment SS: 0

Weir Data
Max Submergence: 0.98 Min Weir Flow El:

Weir Crest Shape
 Broad Crested
 Ogee

OK Cancel

Enter distance between upstream cross section and deck/roadway. (m)

Şekil 5. HEC-RAS'ta köprüye ait verilerin girilmesi

Bir akarsu yatağındaki malzeme veya akarsuyun zemini nedeniyle suyun akış hızına etki edebilecek faktörleri ifade eden katsayıya Manning pürüzlülük katsayısı denir. Akarsuyun bulunduğu noktalarda akarsu zemininde bulunan ve suyun akış hızına etkisini ifade eden bir katsayıdır. Manning katsayısına etki ederek suyun hızının değişimine neden olan en önemli nedenler; suyun akış yatağı, aktığı yerdeki yamaçların büyüklüğü ve derenin akış şeklidir.

$$Q=V*A \quad (1)$$

$$Q=\frac{A}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \quad (2)$$

$$V=\frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \quad (3)$$

akarsu debi ve suyun hızına ait formüllerin açılımı bu şekildedir.

Burada;

Q= Debi, (m³/s),

V=Hız, (m/s),

A= Alan, (m²),

n =Manning pürüzlülük katsayısı,

R=Hidrolik yarıçap, (m),

S=Eğim, (m/m)'i ifade etmektedir.

Su yüzü profillerini doğru olarak elde etmede “n” pürüzlülük katsayısı önemli rol oynamaktadır. Bu değer birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir [13]. Çalışmada pürüzlülük değerini hesaplamak için Cowan yönteminden faydalanılmıştır. Yöntem 1956 yılında W.L. Cowan [14] tarafından geliştirilmiş ve 1989 yılında U.S.Geological Survey [15] tarafından modifiye edilmiştir. Yöntemde kullanılan denklem;

$$n = m * (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \quad (4)$$

Burada;

m : Akarsu kanalının kıvrım derecesini ifade eder,

n_b :Akarsu kanalının zemin özelliklerini ifade eder,

n_1 : Akarsu kanalının yüzey düzensizliklerinin etkilerini ifade eder,

n_2 : Akarsu kanalının enkesit şekli ve büyüklüğündeki değişimleri ifade eder,

n_3 :Akarsu kanalındaki engellerin etkisini ifade eder,

n_4 : Akım şartları ve bitki örtüsünü ifade eder.

Çalışmada incelenen akarsu kesimi için belirlenen katsayılar Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Akarsu pürüzlülük katsayısının belirlenmesi

Kanal Şartları		Değer Aralıkları		Arazi Değerleri
Zemin özellikleri	Toprak	n_b	0.020	0.020
	Kaya		0.025	
	Kum		0.026	
	Çakıl		0.028	
Yüzey düzensizlikleri	Pürüzsüz	n_1	0.000	0.000
	Önemsiz		0.005	
	Orta		0.010	
	Şiddetli		0.020	
Enkesit şekli ve büyüklüğü	Aşamalı	n_2	0.000	0.000
	Arasına Değişen		0.005	
	Sık Değişen		0.010-0.015	
Engel etkileri	İhmal edilebilir	n_3	0.000	0.000
	Önemsiz		0.010-0.015	
	Kayda değer		0.020-0.030	
	Şiddetli		0.040-0.060	
Bitki örtüsü	Düşük	n_4	0.005-0.010	0.020
	Orta		0.010-0.025	
	Yüksek		0.025-0.050	
	Çok Yüksek		0.050-0.100	
Kıvrım derecesi	Önemsiz	m	1.000	1.000
	Kayda değer		1.150	
	Şiddetli		1.300	

Cowan yöntemine göre yapılan hesaplamalara göre pürüzlülük katsayısı 0.040 olarak belirlenmiştir. Çalışmada, akarsuyun sadece 10 km'lik kısmı incelendiğinden akarsu özelliklerinin fazla değişmediği düşünülerek burada tek pürüzlülük değeri kullanılmıştır. Hesaplanan Manning pürüzlülük katsayısı Şekil 6'da gösterildiği gibi her kesiti belirtilecek şekilde programa girilmiştir.

Edit Manning's n or k Values

River: t Reach: r All Regions Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Selected Area Edit Options: Add Constant ... Multiply Factor ... Set Values ... Replace ... Reduce to L Ch R ...

	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	18829.44	n	0.04	0.04	0.04
2	18441.51	n	0.04	0.04	0.04
3	18142.97	n	0.04	0.04	0.04
4	17667.28	n	0.04	0.04	0.04
5	16906.69	n	0.04	0.04	0.04
6	15981.14	n	0.04	0.04	0.04
7	14798.43	n	0.04	0.04	0.04
8	13771.92	n	0.04	0.04	0.04
9	12931.4	n	0.04	0.04	0.04
10	12393.81	n	0.04	0.04	0.04
11	10247.99	n	0.04	0.04	0.04
12	8405.66	n	0.04	0.04	0.04
13	6439.655	n	0.04	0.04	0.04
14	5783.055	n	0.04	0.04	0.04
15	4913.016	n	0.04	0.04	0.04
16	4649.861	Bridge			
17	4319.224	n	0.04	0.04	0.04
18	3432.231	n	0.04	0.04	0.04
19	2834.396	n	0.04	0.04	0.04
20	2240.67	n	0.04	0.04	0.04
21	1646.607	n	0.04	0.04	0.04
22	846.6968	n	0.04	0.04	0.04

OK Cancel Help

Şekil 6. En kesitlerdeki pürüzlülük katsayısı

DSİ 3. Bölge Müdürlüğünden alınmış olan akarsuya ait $Q_{50}=139,58 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{100}=211,40 \text{ m}^3/\text{s}$ taşkın debileri Şekil 7'de görüldüğü gibi HEC-RAS programına işlenmiştir.

Steady Flow Data - ne

File Options Help

Description: Apply Data

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): 2 Reach Boundary Conditions ...

Locations of Flow Data Changes

River: t Reach: r River Sta.: 18829.44 Add Multiple... Add A Flow Change Location

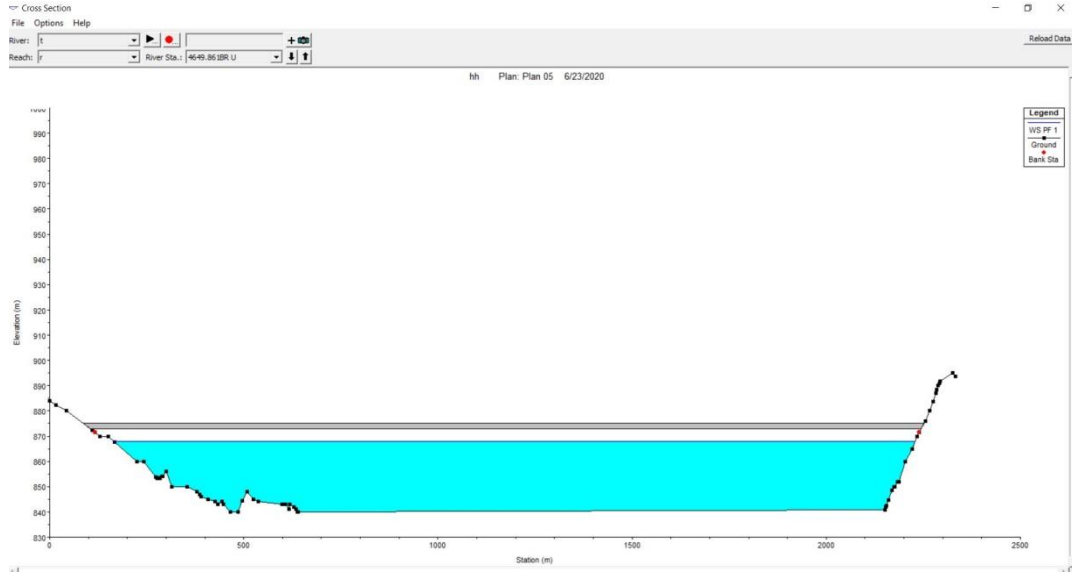
Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates	
River	Reach	RS	PF 1	PF 2
1 t	r	18829.44	139.58	211.4

Edit Steady flow data for the profiles (m3/s)

Şekil 7. Taşkın debilerinin programa girilmesi

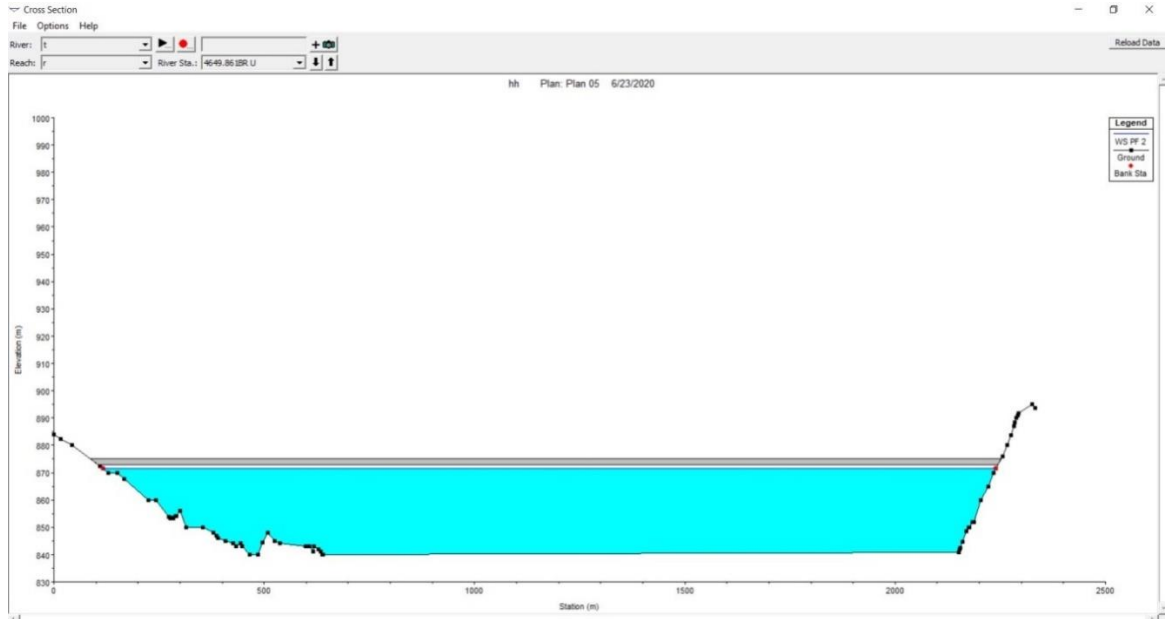
IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

Fıdanlık köprüsüne ait girilen veriler sonucunda $Q_{50}=139,58 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{100}=211,40 \text{ m}^3/\text{s}$ taşkın debilerindeki köprünün durumunu gösterir analiz HEC-RAS ile yapılmış ve sonuçlara ait çıktılar aşağıda görülmektedir (Şekil 8.).



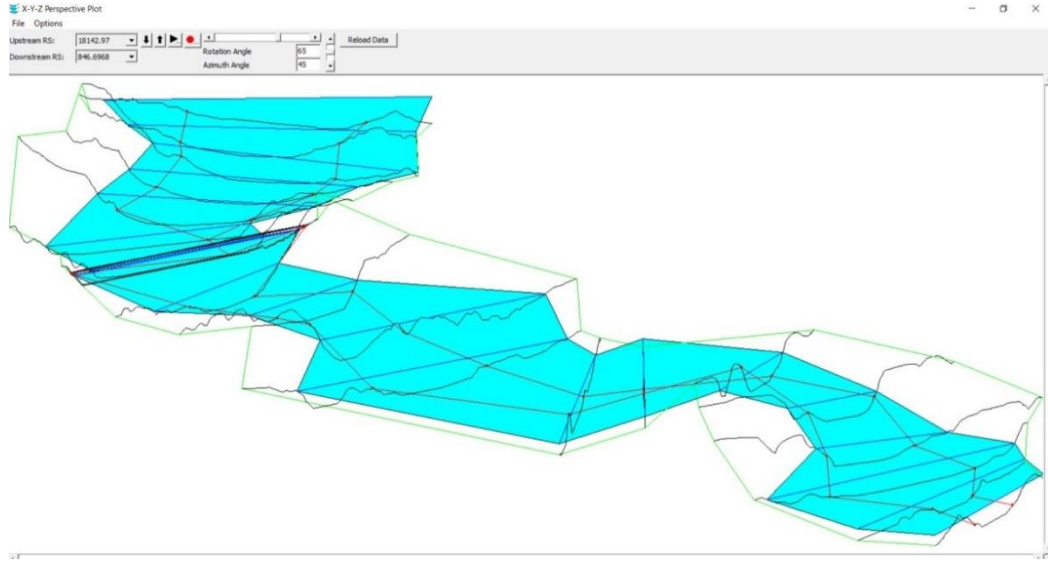
Şekil 8. $Q_{50}=139,58 \text{ m}^3/\text{s}$ debisindeki köprü tabliyesinin durumu

Şekil 8’de köprünün tabliyesi ve ayak açıklığının $Q_{50}=139,58 \text{ m}^3/\text{s}$ taşkın debisini karşılamakta oldukça güvenli olduğu ve köprü tasarımı ile ilgili herhangi bir sıkıntı bulunmadığı görülmektedir. Bu durumda 873 m kotundaki köprü tabliyesi alt kotuna 5 m mesafede olup 868 m kotunda su yüzü kotu olduğu görülmektedir.



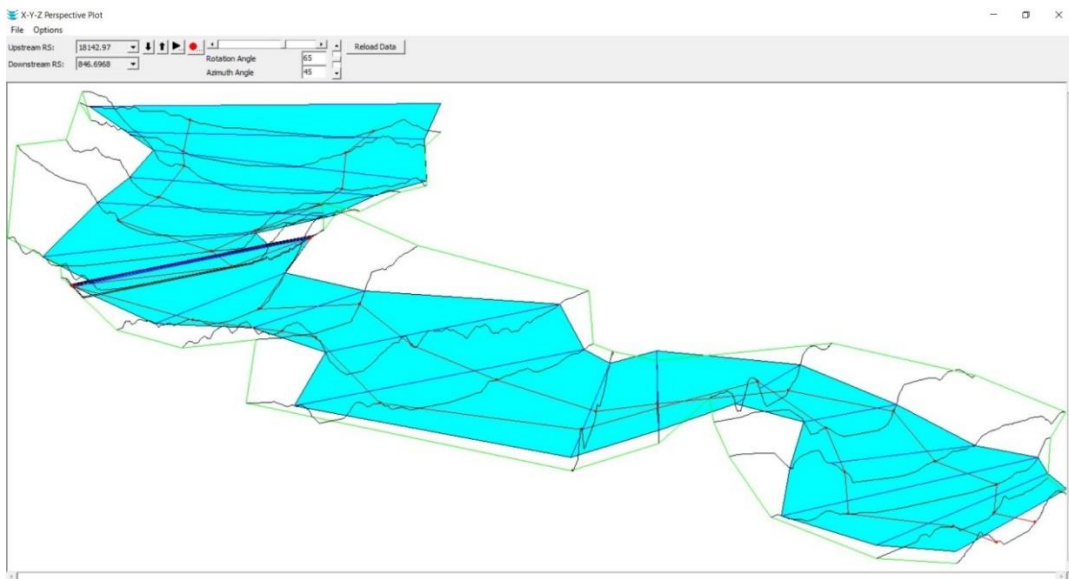
Şekil 9. $Q_{100}=211,40 \text{ m}^3/\text{s}$ debisindeki köprü tabliyesinin durumu

Şekil 9'da ise $Q_{100}=211,40 \text{ m}^3/\text{s}$ taşkın debisinin karşılanmasında, köprü tabliyesi ve köprü açıklığının sınır değere çok yakın olmasına rağmen köprünün güvenli bölgede kaldığı görülmektedir. Bunda köprünün orta ayaksız olarak tasarlanmasının ve yapılan hava payı hesabının oldukça etkili olduğu görülmektedir. Şekil 9'a göre 873 m kotundaki köprü tabliyesi ile su yüzeyi arasında 1,5 m'lik kot farkı olduğu görülmüştür. DSI'nin planladığı gibi 100 yılda bir gelebilecek taşkında su yüzeyi kotu ile tabliye arasında 1,5 m'lik bir hava payı kaldığı hesaplarda doğrulanmıştır.



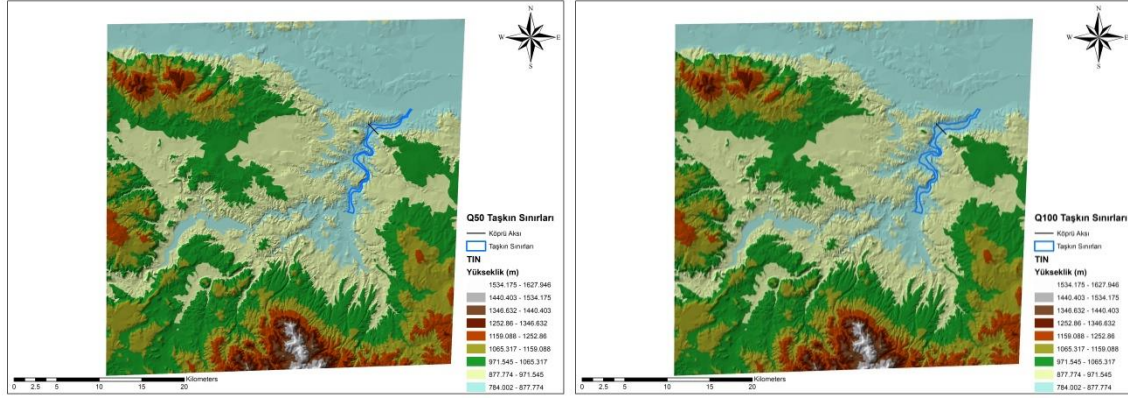
Şekil 10. $Q_{50}=139,58 \text{ m}^3/\text{s}$ debisindeki su yüzü profili

HEC-RAS bir boyutta ve düzensiz akımları modelleyen bir analiz programıdır. Köprüye ait geometrik verilerin, memba ve mansabına çizdiğimiz en kesitlerin Q_{50} ve Q_{100} taşkın debilerindeki durumu sonucu oluşan arazi topoğrafyasına ait akarsu su yüzü profilleri Şekil 10 ve Şekil 11'de 3X-Y-Z koordinatlarında perspektif olarak görülmektedir.



Şekil 11. $Q_{100}=211,40 \text{ m}^3/\text{s}$ debisindeki su yüzü profili

Akarsu su yüzü profili ve köprü en kesitindeki taşkın durumunu HEC-RAS sayesinde analiz ederek gerçek arazi geometrisinde köprü güvenliğini üç boyutlu olarak test edilmiştir. Ayrıca incelenen 10 km'lik akarsu kesiminde Q_{50} ve Q_{100} taşkın debilerinin oluşturacağı taşkın sınırları belirlenmiştir (Şekil 12 a,b).



Şekil 12. a) Q_{50} taşkın debisine göre taşkın sınırları b) Q_{100} taşkın debisine göre taşkın sınırları

İncelenen akarsu güzergâhı boyunca yerleşim alanı bulunmamaktadır. Ancak güzergâh boyunca akarsuyun sol ve sağ sahilinde birçok tarım arazisi mevcuttur. 50 yılda bir gelebilecek taşkın debisinde tarım arazilerinin çok az bir kısmı etkilenmektedir. Özellikle köprüünün mansabındaki tarım arazileri etkilenmektedir. Ancak durum 100 yılda bir gelebilecek taşkın debisinde değişmektedir. Bu durumda tarım arazilerinin yalnızca akarsuyun mansabında kalanlar eğil mansabındakilerde etkilenmektedir. Akarsuya komşu sol ve sağ sahilinde kalan tarım arazileri dışında kalan araziler etkilenmemektedir. Özellikle bölgede piknik ve mesire alanı olarak hizmet veren orman fidanlığı bölgesinin önemli bir kısmı Q_{100} taşkın debisinden daha büyük sular geldiğinde sular altında kalma riski yaşayabileceği görülmüştür. Köprüünün yapıldığı aks kesit genişliği Q_{100} 'lük bir taşkın debisinde yalnızca 1,5 m hava payıyla kapasitesinin maksimumunu karşılayabilecek durumdadır. İncelenen akarsu güzergâhı boyunca imar izni şuanda bulunmamaktadır. Ancak ileriki yıllarda bölgede bulunan tarım arazilerine imar verilmesi durumunda taşkın riski altında olacağından sosyal ve ekonomik zararları göz önünde bulundurulmalıdır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada Eskişehir Porsuk Çayı üzerine DSİ tarafından yapılmış olan Fidanlık köprüsünün hidrolik açıdan güvenliği ve analizi HEC-RAS programıyla test edilerek ve yorumlanmıştır. Yapılan analiz sonucunda yapılacak köprülerin tasarım aşamasında hidrolik verilerin de dikkate alınmasının ne denli önemli olduğu ortaya ortaya konmuştur. Köprü tasarımının orta ayaksız olarak yapılması ve yapımı için seçilen konum düşünüldüğünde köprü tabliyesi ve açıklığının Q_{50} ve Q_{100} taşkın debilerini güvenle karşılayabildiği bilgisayar ortamında görülmüştür. Ancak bölgenin akarsu yatak genişliği ve düşük eğimli olması güzergâh boyunca bulunan tarım arazilerini gelebilecek taşkın büyüklüklerinin etkileyebileceği görülmüştür. Özellikle 100 yıllık bir periyotta oluşabilecek taşkın büyüklüğünde akarsuyun sağ ve sol sahiline komşu tarım arazilerini etkileyebileceği görülmüştür. Bölge için Q_{100} debisinden daha büyük bir debide bölge halkının sıklıkla tercih ettiği mesire alanının da etkilenebileceği öngörülmüştür. Eskişehir hızla büyüyen bir şehir olduğu göz önünde bulundurulduğunda ileriki yıllarda incelenen güzergâh boyunca imarlaşma durumunda bölgenin taşkın riski altında olacağı unutulmaması gerekmektedir. Ancak köprüünün üzerinde bulunduğu Porsuk çayının Porsuk barajıyla taşkın risklerine karşı korunduğu da bilinmektedir.

HEC-RAS programı ile hem köprüünün bulunduğu yerdeki en kesitte taşkın anındaki tabliyenin durumunu, hem de akarsu yatağında taşkın debilerindeki arazinin durumu analiz edilmiştir. Köprüye $139,58 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik Q_{50} taşkın büyüklüğü gelmesi durumunda köprü tabliyesi ve su yüzeyi kotu arasında 5 m olacağı görülmüştür. Bu durum Q_{50} taşkın büyüklüğünde köprüünün güvenli bir şekilde stabilitesini koruyabileceğini ortaya koymuştur. Ancak $211,40 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik Q_{100} taşkın büyüklüğünde köprü tabliyesi ve su yüzeyi kotları arasında

yalnızca 1,5 m fark olacağı görülmüştür. Bu durum köprü'nün güvenle geçirebileceği suyun maksimum sınıır şartlarını oluşturmaktadır. Bu durumda köprü'nün 211,40 m³/s debiden fazlası gelmesi durumunda statik olarak tehlikeli duruma geçebileceğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada bir akarsu üzerine planlanan bir köprü'nün akarsuyun hidrolik etkileri açısından analizlerinin yapılabileceğini ortaya konulmuştur. Böylelikle planlanmış işletmede veya işletmede olmayan tüm su yapılarının tasarımı bölgedeki taşkın debi büyüklüklerine göre analiz edilebileceği Eskişehir'de DSİ tarafından yapılmış olan Fidanlık köprü'sü örneği üzerinden gösterilmiştir. CBS ve HEC-RAS gibi yazılımların köprü güvenliği çalışmalarında gelecekte de kullanılmaya devam edeceği düşünülmektedir. Mevcut bir akarsu üzerinde bulunan köprü'nün gelebilecek taşkın büyüklüklerinde su yükselmesi, köprü tabliyesini ne kadar tehdit ettiği, su yükseklikleri belirlenmesi hesaplarında CBS ve HEC-RAS gibi yazılımların günümüzde olduğu gibi gelecekte de kullanılmaya devam edileceği düşünülmektedir. Bu çalışmayla literatürde taşkın ve köprü güvenliği konularında yapılan çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle son yıllarda sıklıkla can ve mal kaybına yol açan taşkın felaketlerinin su yapıları üzerindeki hidrolik etkilerinin belirlenerek köprü tasarım kriterlerinin belirlenmesi açısından günümüzde ve gelecekte yeni fikir ve çalışmalarla bu konudaki araştırmaların devam edeceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Darama Y. (2013). Taşkın Tehlike Haritaları Çalışmaları, *DSİ Hizmet İçi Eğitim Semineri*, Ankara.
- [2] DSİ, (2011). Sargın A. H., *Coğrafi Bilgi Sistemleri İle Taşkın Riski Ön Değerlendirmesi*, Ankara.
- [3] Bülbül, M. M., &Demirel, E.(2012). Taşkın Sırasındaki Köprü Ayaklarındaki Kabarmaların Analizi: Ova Çayı Örneği. *İnşaat Mühendisliği'nde 100. Yıl Teknik Kongresi*, 22-24 Kasım, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [4] Doğu,A., &Yıldız, O. (2019). Kırıkkale Çoruzözü Deresi'nde Bir Boyutlu Taşkın Modellemesi. *K.Ü. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*.11. Cilt (2), 748-758.
- [5] Efe,H., &Önen, F. (2015). Batman Çayı'nın Taşkın Analizinin HEC-RAS Programıyla Yapılması. *D.Ü. Mühendislik Dergisi*.6. Cilt (2), 83-92.
- [6] Ercan,B., Yağcı, E. A., &Ünsal, M. (2019). KahramanmaraşDomuz (Boğaz) DeresiKuşaklamaKanalının HEC-RAS Modeli.AÇÜ.DoğalAfetlerAraştırmaveUygulamaMerkezi, *DoğalAfetlerveÇevreDergisi*.5. Cilt (1), 58-64.
- [7] Karaca C.,Birdal C,A., &Türk, T. (2016). Taşkın Risk Alanlarının Coğrafi Bilgi Sistemleri ile İncelenmesi. *6. Uzaktan Algılama CBS Sempozyumu (UZAL-CBS)*, 5-7 Ekim, Adana, 118-125.
- [8] Özdemir, H.(2007). Taşkınların Haritalanmasında Hec-GeoRAS ve HEC-RAS'ın Kullanımı: Havran Çayı Örneği (Balıkesir).*Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, 30 Ekim-2Kasım, Trabzon.
- [9] Seçilir, S. (2005). *Akarsular Üzerindeki Farklı Kesitli Köprü Yapılarının Su Yüzü Profillerine Etkisi*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- [10] Taş, E., İçağa, Y., &Zorluer, E. (2016). Taşkın Yayılım Haritalarının Oluşturulması veTaşkın Zarar Analizi: Akarçay Afyon Alt Havzası Örneği. *AKÜ. Fen veMühendislikBilimleriDergisi*.16. Cilt (3), 711-721.
- [11] Üyüküoğlu, M.,Ünal, B.,&Turan, B.(2015). HEC-RAS Paket Programı İle Manavgat İlçesi Ilıca Deresi Taşkın Bölgesinin Modellenmesi.4. *Su Yapıları Sempozyumu*, 19-20Kasım, Antalya.

- [12] USACE. (2009). HEC-GeoRAS, GIS Tools for support of HEC-RAS using ArcGIS, User's Manual, Version 4.2.
- [13] Oğraş, S., & Önen, F. (2019). Dicle Nehri'nin taşkın analizinin HEC-RAS programı ile yapılması. DÜMF Mühendislik Dergisi 10(3), 1087-1098.
- [14] Cowan, W. L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. Agric. Eng., 37(7), 473–475.
- [15] Arcement, V. R., & Schneider, G. J. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 2339.

Araştırma Makalesi - Research Article

Isıl İşlemin Akımsız Ni-B/Ni-B-W Dupleks Kaplamanın Korozyon Direncine Etkisinin Analiz Edilmesi

Gökçe Dil¹, Ali Gökşenli^{2*}, Behiye Yüksel³, Faiz Muhaffel⁴

Geliş / Received: 08/04/2020

Revize / Revised: 06/09/2020

Kabul / Accepted: 07/09/2020

ÖZ

Bu çalışmada çelik malzemenin yüzeyi, akımsız kaplama yöntemi ile Ni-B/Ni-B-W ile kaplanmış, kaplamaların içyapı ve korozyon direnci incelenmiştir. Ni-B/Ni-B-W kaplaması asidik hipofosfit ve alkanin borohidrid indirgeyici banyolarla akımsız olarak kaplanmıştır. Kimyasal bileşim analizi için EDS yöntemi kullanılmıştır. Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) ile kaplamanın kesit ve yüzey morfolojisi incelenmiştir. SEM analizi sonucu kaplamaların üniform olduğu, yüzeye çok iyi bir adezif bağ ile gözeneksiz bir şekilde bağlandığı ve kaplamaların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. XRD analizleri sonucu her iki kaplamanın da amorf yapıda olduğu, 450 °C'de bir saat uygulanan ısıtma işlemi ile kaplamanın kristalleştiği ve nikel borit (Ni₂B ve Ni₃B) çöktürmelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Çelik, ısıtma işlemi görmemiş ve görmüş Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W kaplamaların korozyon karakterini incelemek için 5% H₂SO₄ çözeltide daldırma ve Potansiyometrik Polarizasyon deneyleri (%3,5 NaCl sulu çözeltide) gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucu her iki tür kaplamanın korozyon direncinin kaplanan malzeme olan çelikten daha yüksek olduğu görülmüştür. Isıtma işlemi görmemiş Ni-B/Ni-B-W kaplamasının korozyon direncinin Ni-B kaplamaya göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Isıtma işleminin uygulanması sonucu her iki kaplamanın da korozyon direnci artmıştır. Ancak Ni-B/Ni-B-W dupleks kaplamasında artış Ni-B kaplamaya göre daha fazladır. Kaplamaya tungstenin eklenmesi ile ısıtma işlemi sonrası yüzeyde oluşan koruyucu tungsten oksit tabakasından dolayı, kaplamanın korozyon direnci artmıştır.

Anahtar Kelimeler- Akımsız Kaplama, Korozyon Direnci, Ni-B/Ni-B-W, Isıtma İşlem

¹İletişim: gdil@ford.com.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2036-4413>)

Ford Otosan Ar-Ge Merkezi, İstanbul.

²Sorumlu yazar İletişim: goksenli@itu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1068-8705>)

Makina Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34437, İstanbul.

³İletişim: behieyuksele@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-4645-6460>)

Metalurji ve Malzeme Mühendislik Bölümü, İstanbul Gedik Üniversitesi, 34876, İstanbul.

⁴İletişim: muhaffel@itu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9814-7478>)

Kimya ve Metalurji Mühendislik Bölümü İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, İstanbul.

Analysis of the Effect of Heat Treatment on Corrosion Resistance of Electroless Ni-B/Ni-B-W Duplex Coating

ABSTRACT

The present work deals with the formation of Ni-B/Ni-B-W duplex coatings on steel by electroless plating process and evaluation of their microstructure and corrosion resistance. The Ni-B/Ni-B-W duplex coatings were prepared using dual baths (alkaline borohydride- reduced electroless nickel baths) with Ni-B as inner layer. EDS analyses were carried out for chemical composition analyses. Scanning electron microscopy (SEM) of the cross-sectional view of the electroless nickel duplex coatings reveal that the coatings are uniform and the compatibility between the layers is good. Also the surface morphology was analysed to characterize the surface properties. Coatings were characterized using XRD. The study reveals that the Ni-B and Ni-B-W coatings are amorphous in their as-plated condition and upon heat treatment at 450 °C for 1 h, both Ni-B and Ni-B-W coatings crystallize and produce nickel and nickel borides (Ni_2B ve Ni_3B) in the respective coatings. Polarization tests (in 3,5% NaCl aqueous solution) and immersion tests (in 5% H_2SO_4 solutions) were carried out to analyse the corrosion properties. The tests were applied on substrate steel, as-plated and heat treated Ni-B and Ni-B/Ni-B-W coatings and were compared with each other. According to the results, all coatings performed better corrosion resistance (CR) than the substrate steel. As-plated Ni-B/Ni-B-W coatings demonstrated better CR than Ni-B coatings. By applying heat treatment, corrosion characteristics improved in both Ni-B and Ni-B/Ni-B-W coatings but much more improvement was observed by Ni-B/Ni-B-W coatings. Adding tungsten to the coating improved additionally the CR due to the formation of protective tungsten oxide layer.

Keywords- *Electroless Coating, Corrosion Resistance, Ni-B/Ni-B-W, Heat Treatment*

I. GİRİŞ

Genel tanım olarak akımsız kaplama; bir kimyasal kaplama yöntemi olup, herhangi bir elektrik akım kaynağı kullanmadan, çözelti içindeki metallerin yüzeyde biriktirilmesi [1] En yaygın olarak kullanılan kaplama malzemesi nikel dir. Çözelti, metal tuzu, nikel iyonunun indirgenmesi için redükleyici ajan, karmaşık elemanlardan, stabilizatörden, hızlandırıcı, frenleyiciler, pH ayarlayıcılar ve ıslatabilirlik ajanlarından oluşmaktadır. Nikel tuzları içeren bir çözeltiye daldırılmış olan ve kaplanmasını istediğimiz malzeme, çözelti içinde bulunan redükleyicilerin etkisi ile nikel iyonlarının nikel metaline redüklenmesi reaksiyonu sonucu yüzeyde bir kaplama oluşturmasına “Akımsız nikel kaplama” denmektedir [2]. Redükleme esnasında açığa çıkan bor ile reaksiyona girip birleşen nikel bir nikel alaşımı meydana getirir. Meydana gelen bu redüklenme, katalitik karakter gösteren nikel üzerinde devam ederek kaplamanın birikip kalınlaşmasına neden olmaktadır. Oluşan şekilden dolayı bu tip kaplamalara aynı zamanda “Otokatalitik Kaplamalar” da denmektedir. Akımsız kaplama yöntemi 1946’da Brenner ve Riddell tarafından geliştirilmiştir. [3]. Günümüzde akımsız nikel kaplamaları makina, otomotiv, uçak-uzay, kimya, elektronik, gıda, bilgisayar gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. [4-6]. Akımsız nikel kaplamaların en önemli avantajı, parça geometrisinden bağımsız olarak yüzeyi aynı kalınlıkta ve homojen bir şekilde kaplayabilmesidir. [7]. Diğer avantajları ise; yüksek korozyon direnci, metal ve plastik seramik gibi metal olmayan malzemelerin de kaplanması, kaynak ve lehimleme uygunluğu, yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip olmakla birlikte sertlik değerlerin ısı ile arttırılabilmesidir [8-10]. Bu avantajlarından dolayı günümüzde krom kaplamalarına alternatif olarak da kullanılmaktadır. Dezavantajları ise kaplamanın gevrek karakterde olması, akımlı kaplama yöntemlerine göre sürecin daha yavaş olması, kaplama karakterinin çözelti ve kaplama süreç parametrelerinin değişiminden oldukça etkilenmesinden dolayı kaplamanın çok kontrollü yapılması gerekliliği. Kaplamada kullanılan redükleyici türüne bağlı olarak Ni-P veya Ni-B kaplamaları elde edilmektedir. Ni-P kaplamaları yüksek korozyon direnci ve kaynak-lehimleme kapasitesine sahiptir [11-15]. Ni-B kaplamaları ise yüksek sertlik ve gelişmiş tribolojik özelliklere sahiptir. Ni-B kaplamaların özelliklerini geliştirmek için farklı yöntemler kullanılmıştır [16-19]. Kaplamaya bakır, tungsten, kobalt, molibden gibi ikinci bir metalin (M) eklenmesiyle Ni-B-M şeklinde kaplamaların oluşturulması bir alternatiftir [20-24]. Diğer bir yöntem ise kaplamaların içine WC, SiC, BN gibi farklı sert seramik parçacıkların ilave edilerek özellikle kaplamaların tribolojik özellikleri geliştirilmiştir [25-28]. Alternatif çözümler arasında üst üste çoklu kaplamalar yer almaktadır [29-32]. Bu tip kaplamalarda Ni-P ve Ni-B gibi iki veya üç farklı nikel alaşımlı kaplamalar oluşturulmaktadır [33]. Nikel kaplamaları amorf bir yapıya sahiptir, ancak uygulanan ısı ile kristal bir yapı oluşmaktadır. Kristal yapı nedeniyle kaplamanın tribolojik ve korozif özellikleri değişmektedir [34,35]. Çoklu katmanlı kaplamaların avantajları, malzemenin sertlik ve aşınma direnci özelliklerinin iyileştirmesidir. Özellikle uygulanan ısı ile kristal yapıdaki kaplamaların tribolojik özelliklerinde artış tespit edilmiştir [33]. Dupleks kaplamanın diğer avantajı ise her bir kaplamanın farklı korozyon potansiyel değerine sahip olmasından dolayı katodik koruma yöntemiyle korozyon direncinin artmasıdır [32]. Dupleks kaplamaların korozif özellikleri literatürde incelenmiş olmasına rağmen, çoklu kaplamalarda kaplamaya metal ilavesinin ve aynı anda ısı ile işlem uygulamanın etkileri fazla incelenmemiştir. Bu çalışmada çelik malzeme üzerine akımsız Ni-B/Ni-B-W dupleks kaplaması üzerinde oluşturulacaktır. İlave metal olarak tungstenin tercih edilmesinin nedeni, üstün aşınma direnci ve korozif direnci özelliği göstermesidir [36-39]. Tungsten ilavesi ve uygulanan ısı ile kaplama yüzeyinde korozyon direncini arttıran yoğun tungstenoksit tabakası oluşmaktadır [40,41]. Oluşturulan tungsten metal takviyeli Ni-B/Ni-B-W dupleks katmanlı kaplamaya ısı ile işlem uygulanarak ısı ile işlemin içyapı, yüzey morfolojisi ve korozyon direnci özellikleri açısından analiz edilecek, çelik ve Ni-B kaplaması ile karşılaştırılacaktır.

II. DENEYSEL YÖNTEMLER

Deney numunesi olarak 20x70x4 ve 20x40x4 mm boyutlarında basit karbonlu test numuneleri hazırlanmıştır. Deney numunesi kademeli olarak kabadan inceye doğru (1200) parlatılmış, trikloretilende daldırdıktan sonra ultrasonik banyoda 70 °C de deterjan ile temizlenmiştir. Numuneler daha sonra %30 luk HCl çözeltiye iki dakikalığına daldırılmış ve akabinde damıtılmış su ile durulanmıştır. Ön hazırlama işlemlerinden hemen sonra akımsız kaplama işlemlerine başlanmıştır. Çalışmamızda yeni bir formülasyon kullanılmıştır. Çözeltilerde yüksek çözünürlüğe sahip ve kararlı yapısından dolayı sodyum borohidrid, stabilizatör olarak da kurşun tungstat (PbWO₄) kullanılmıştır. PbWO₄, talyum nitrat gibi çevresel problemler oluşturmamaktadır. Çözelti pH değerinin 13,5 da olmasını sağlamak amacıyla potasyum hidroksit tercih edilmiştir. Çözeltide nikel iyonlarını elde edebilmek için herhangi bir çözülebilen tuz kullanılabilirken, nikel klorid anyonların kaplama çözeltisindeki diğer bileşenlerden daha inert olması nedeniyle tercih edilmiştir. Nikel hidroksitin çökmesini

önlemek amacıyla etilendiamin çözeltiye eklenmiştir. NiB/Ni-B-W dubleks kaplamasını oluşturmak için banyo kaplama bileşenleri ve çalışma şartları tablo 1 de görülmektedir.

Tablo 1. Akımsız NiB/Ni-B-W kaplaması için çözeltinin bileşenleri ve çalışma ortamı

	Bileşen	Çalışma ortamı
Ana solüsyon	NiCl ₂ 24 g/l	ph 13,5 ± 0,2 Sıcaklık 90 ± 2 °C Süre 2 saat
	EDA 60 ml/l	
	KOH 26,5 g/l	
İndirgeyici solüsyonu	Na ₂ WO ₄ * 2H ₂ O 40 g/l	
	NaBH ₄ 120 g/l	
Stabilizatör (Dengeleyici) solüsyonu	NaOH 263 g/l	
	PbWO ₄ 2,6 g/l	
	EDA 40 ml/l	
	EDTA 13 ml/l	

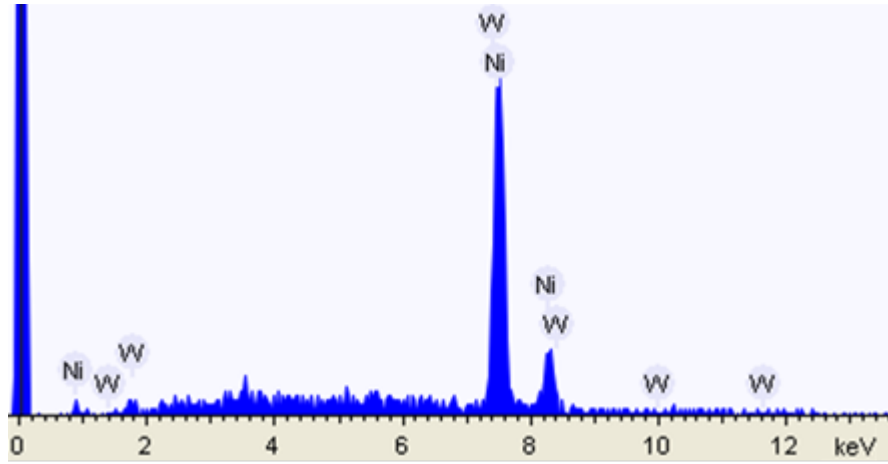
Çözeltinin hazırlanmasında manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Test numunelerinin banyoya daldırılmasından sonra her 30 dakikada bir çözeltiye 2,6 ml stabilizatör ve 2,6 ml de indirgeyici bileşenleri eklenmiştir [23]. NiB/Ni-B-W dubleks kaplamalarının bir kısmına daha sonra ısıtma işlemi uygulanmıştır. Isıtma işlemde numuneler atmosferik çalışma şartlarında fırında bir saat boyunca 450 °C sıcaklıkta bir saat tutulmuştur. NiB/Ni-B-W kaplamasının yüzey morfolojisi ve kesit yapısını incelemek amacıyla tarayıcı elektron mikroskop (SEM - JSM-5310, Japan Electronics) tercih edilmiştir. Kaplamanın ısıtma işlemi ve ısıtma işlem sonrası (450 °C de bir saat) yapısını incelemek için X-ışın difraksiyonu (XRD - Rigaku Dymax, Japonya, Cu K α radyasyon (α = 0.154178 nm) ve 50 kV and 300mA'lık monokromatör ve 4°/daklık tarama hızıyla) kullanılmıştır. Kaplamadaki W miktarını tespit edebilmek için, Enerji Dağılım Spektrometre (EDS) analizi kullanılmıştır. Kaplamanın korozyon direncini incelemek amacıyla polarizasyon ve daldırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daldırma deneylerinde çelik, Ni-B ve NiB/Ni-B-W kaplamaları %5 H₂SO₄ çözeltisine daldırılmış ve 7 gün boyunca her gün hassas terazide tartılarak kütle kaybı tespit edilmiştir. Korozyon direncini tespit etmek için elektrokimyasal korozyon testi uygulanmıştır. Numunelere ait elektrokimyasal ölçümler Radiometer marka VoltaLab40 model elektrokimyasal analizör kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla yapılan deneyler ağırlıkça %3.5 NaCl sulu çözeltisi içinde üç elektrotlu (karşı elektrot olarak grafit, referans elektrot olarak ise doymuş kalomel elektrot) hücrede oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çalışma elektrodu olarak kullanılan çelik, ısıtma işlem görmüş ve görmemiş NiB ve NiB/NiBW kaplanmış numuneler, çalışma alanı 1 cm² olacak şekilde epoksi reçine ile kaplanmıştır. Potansiyodinamik eğrilerin elde edilebilmesi için seçilen tarama hızı ise 1 mV/s olmuştur.

III. DENEYLER VE ANALİZLER

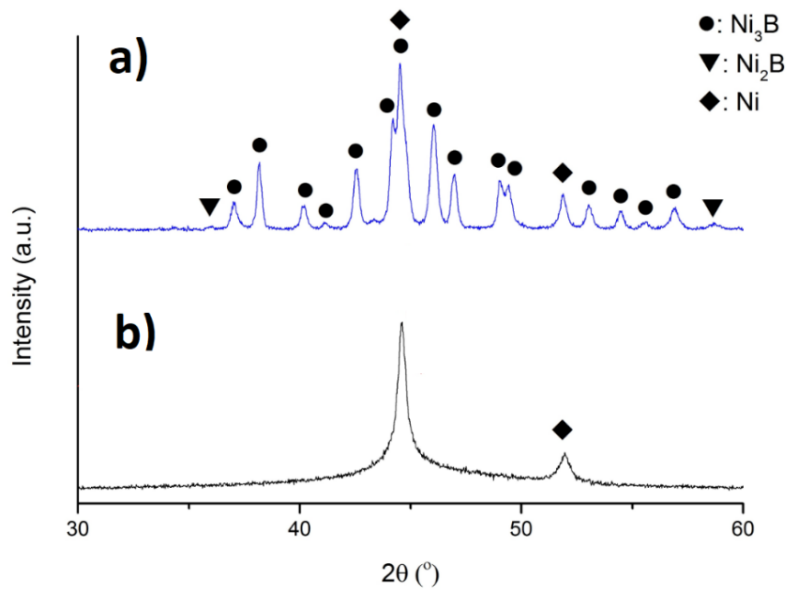
A. İç Yapı ve Yüzey Analizleri

EDS analizi sonucu kaplamada ağırlıkça %0,62 tungstenin (W) varlığı tespit edilmiştir (şekil 1). NiB/Ni-B-W dubleks kaplamalarının içyapı analizini gerçekleştirmek amacıyla ısıtma işlem görmemiş ve 450 °C de 1 saat ısıtma işlem görmüş numunelere XRD analizi gerçekleştirilmiştir (şekil 2).

Isıtma işlem görmemiş kaplamada (şekil 2, b) sadece 2θ=44.8° de bir pike rastlanmıştır ki bu da yüzey merkezli kübik yapıya sahip nikel fazının (1 1 1) düzlemine karşılık gelmektedir. Ancak genel yapı olarak kaplama amorf bir yapıya sahiptir. Isıtma işlem görmüş kaplamada (şekil 2, a) ise nikel borid (Ni₂B ve Ni₃B) nanokristal nikel fazlarının oluşumu görülmektedir. Ni₂B bileşeni az miktarda tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise yarı kararlı Ni₂B bileşeninin yüksek sıcaklıkta daha kararlı bir Ni₃B yapıya dönüşmesidir. Benzer bulgular Krishnaveni tarafından da tespit edilmiştir [13,33].

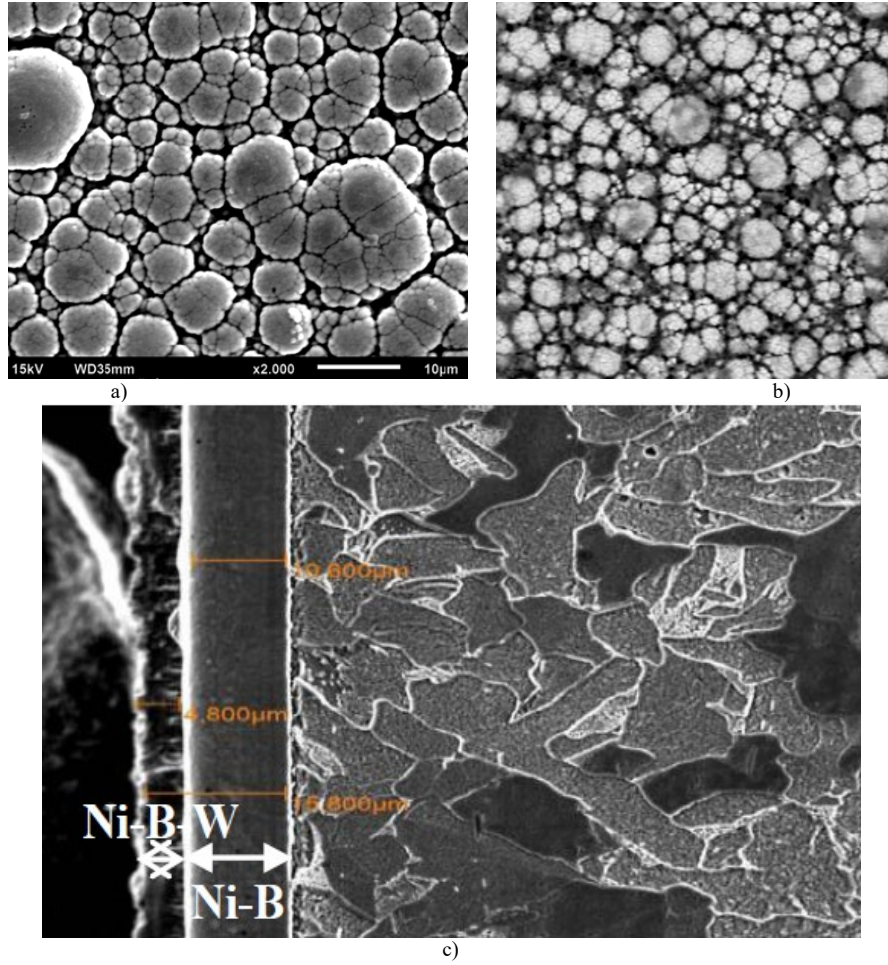


Şekil 1. EDS analizi



Şekil 2. 450 °C de 1 saat ısıtılmış (a) ve ısıtılmemiş (b) numunelerin XRD analiz sonuçları

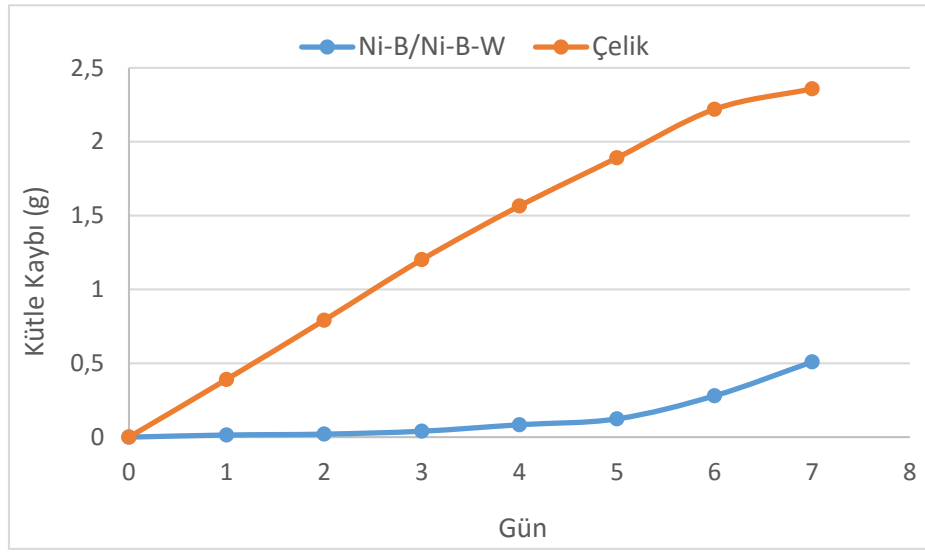
Şekil 3 de ısıtılmemiş (a), 450 °C de 1 saat ısıtılmış sonrası kaplamanın yüzey morfolojisi (b) ve dubleks kaplamanın kesit görüntüsü (c) görülmektedir. Şekil 3 a ve b de yüzeyde, Ni-B kaplamalarında gözlemlenen tipik bir “Karnıbaharimsı” görüntü tespit edilmiştir. Şekil 3 b de küresel yumrucuk yapı olarak görülen şekiller, kristalleşmiş nikel ve nikel borid (Ni_2B ve Ni_3B) yapılarıdır. Kesit görüntüsü incelemesi sonucu 10,6 μm lik Ni-B ve 4,8 μm lik Ni-B-W olmak üzere toplam 15,4 μm lik dubleks kaplamanın oluştuğu tespit edilmiştir. Ni-B kaplamanın çelik zemin malzemesine gözeneksiz bir şekilde adeziv bağ meydana getirdiği görülmüştür.



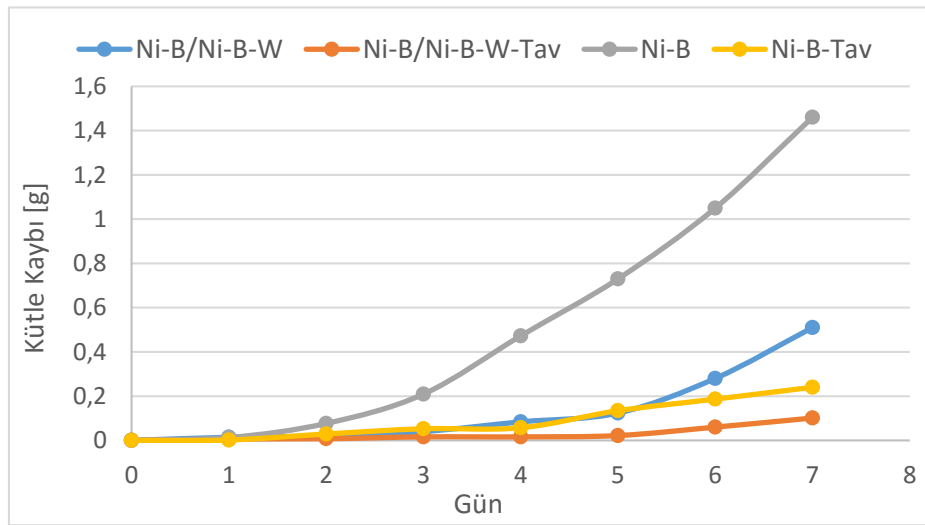
Şekil 3. (a) Ni-B/Ni-B-W kaplamalarının ısıtılma öncesi, (b) 450 °C de 1 saat ısıtılma sonrası yüzey morfolojisi ve (c) dubleks kaplamanın kesit görüntüsü

B. Daldırma Deneyleri

Daldırma deneyleri oda sıcaklığında %5 H₂SO₄ çözeltide gerçekleştirilmiştir. Her 24 saatte bir test numuneleri çözeltiden çıkartılıp, alkolle temizlenip kurutulduktan sonra hassas terazide tartılarak korozyon sonucu kütle kaybı tespit edilmiştir. Bu test yedi gün boyunca devam edilmiştir. Şekil 4 de Ni-B/Ni-B-W kaplaması kaplanan altlık malzeme olan çelik ile kütle kaybı açısından karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi dubleks Ni-B/Ni-B-W kaplaması ile malzemenin korozyon direnci artmış oldu. Farklı kaplama türlerinin ve ısıtılmanın (tavlanmanın) korozyon direncine etkisini analiz edebilmek için ısıtılma görmemiş ve görmüş Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamaları %5 H₂SO₄ çözeltide bekletilmiş ve günlük kütle kaybı kaydedilmiştir (şekil 5). Şekil de de görüldüğü gibi tavlanmış Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W kaplamaların korozyon direnci, ısıtılma görmemiş kaplamalarına artmıştır. Ayrıca Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamaları Ni-B kaplamalarına göre daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.



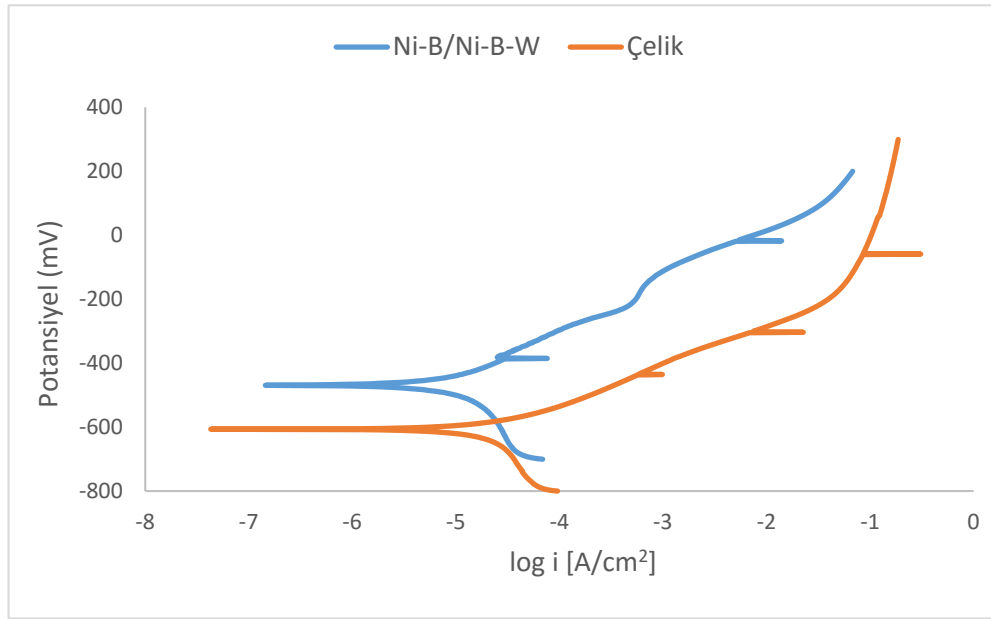
Şekil 4. Çelik ile Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamalarının %5 H₂SO₄ çözeltide bekletmede sonucu kütle kaybı



Şekil 5. Isıl işlem görmemiş ve görmüş Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamalarının %5 H₂SO₄ çözeltide bekletmede sonucu kütle kaybı

C. Potansiyometrik Polarizasyon

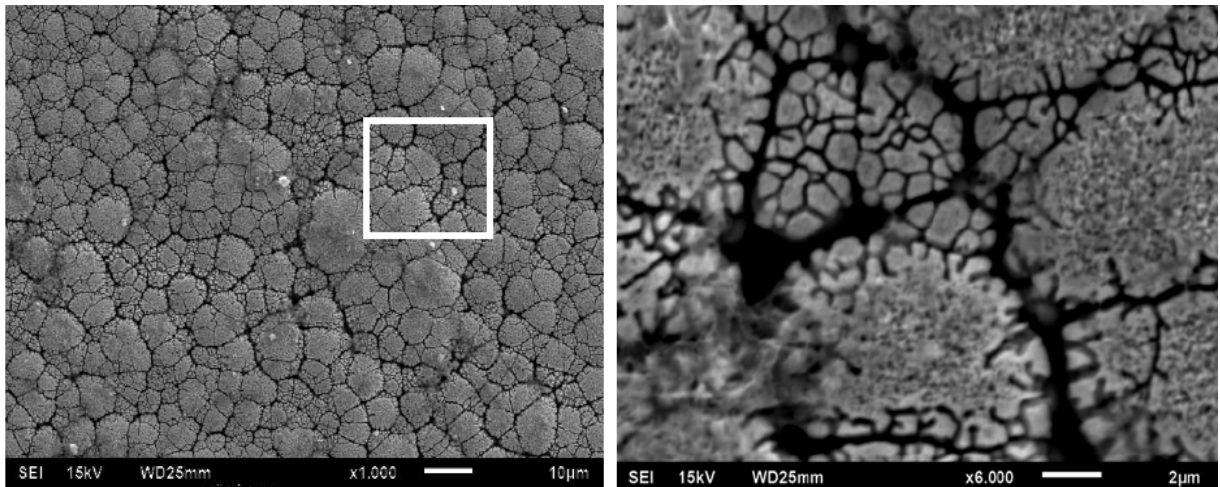
Çeliğin, ısıl işlem görmemiş ve tavlınmış Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W kaplamaların korozyon davranışlarını elektrokimyasal olarak tespit edebilmek için tafel polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Şekil 6 da çelik ile Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamalarının polarizasyon eğrileri, tablo 2 de ise %3,5 sodyum klorid çözeltide gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen korozyon potansiyel (E_{kor}) ve korozyon akım (i_{kor}) değerleri görülmektedir. Şekil 6 ve tablo 2 den de görüldüğü gibi çeliğin korozyon potansiyel değeri -601 mV ve korozyon akımı i_{kor} 23,08 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dir, tavlınmış Ni-B/Ni-B-W kaplamasının E_{kor} değeri -271 mV ve i_{kor} değeri 0,48 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dir. Bu da dubleks kaplamaların çeliğe göre korozyon potansiyeli yaklaşık 300 mV mertebesinde daha pozitif bir değere çektiğini göstermektedir. Şekil 7 de ise %3,5 sodyum klorid çözeltide gerçekleştirilen polarizasyon deneyi sonucunda ısıl işlem görmemiş Ni-B/Ni-B-W kaplamasının SEM yüzey morfolojisi görülmektedir.



Şekil 6. Çelik malzemenin ve ısıtılmış görmemiş Ni-B/Ni-B-W kaplamasının anodik polarizasyon eğrileri

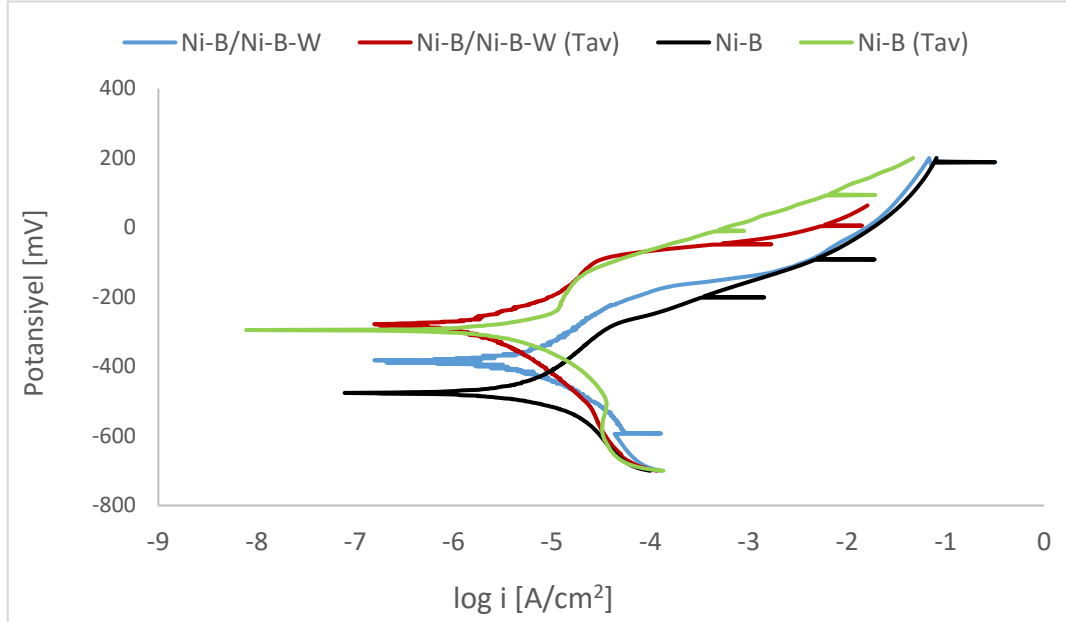
Tablo 2. Potansiyometrik polarizasyon testleri sonucu çelik ve ısıtılmış görmemiş Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamasının korozyon potansiyel (E_{kor}) ve korozyon akımı (i_{kor}) değerleri.

Numune No	E_{kor} (mV)	i_{kor} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Steel	-601	23,08
Ni-B	-473	16,43
Ni-B tavllanmış	-280	1,43
Ni-B/Ni-B-W	-376	11,42
Ni-B/Ni-B-W tavllanmış	-271	0,48



Şekil 7. %3,5 sodyum klorid çözeltide gerçekleştirilen polarizasyon deneyi sonucunda Ni-B/Ni-B-W kaplamasının SEM yüzey morfolojisi

Şekil 8 de ısıtılmış ve ısıtılmamış Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamalarının polarizasyon eğrileri, tablo 3 de ise %3,5 sodyum klorid çözeltide gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen korozyon potansiyel (E_{kor}) ve korozyon akım (i_{kor}) değerleri görülmektedir.



Şekil 8. Isıtılmış ve ısıtılmamış Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W kaplamalarının anodik polarizasyon eğrileri

Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamalarının korozyon direncini tespit etmek için daldırma ve Potansiyometrik Polarizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Korozyon deney sonuçları incelendiğinde, çeliğin korozyon direncinin en kötüsü olduğu görülmüştür. Isıtılmış ve ısıtılmamış Ni-B/Ni-B-W kaplamasının korozyon direnci Ni-B kaplamaya göre, az da olsa, daha iyidir. Isıtılmanın uygulanması sonucu her iki kaplamanın da korozyon direnci artmıştır. Ancak Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamasında bu artış Ni-B kaplamaya göre daha fazladır. Belirtilen kaplamalar ve tavla işlemleri sonucu korozyon direncindeki artışın nedenlerinin araştırılması sonucu şu sonuçlara ulaşılmıştır; Song [42] tarafından da belirtildiği gibi, akımsız nikel kaplamalar sonucu kaplamada artık çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmelerin varlığı, korozyon oluşumunu hızlandırmaktadır. Isıtılmanın sonrası ise kaplamanın iç yapısı amorf yapıdan kristal yapıya dönüşmektedir. Bu da mikrotanelerin ve tane sınırlarının oluşması demektir. Kaplama içindeki tungsten (W), ısıtılmanın esnasında oluşan bu tane sınırlarından hareket ederek yüzeye ulaşabilmekte ve yüzeyde koruyucu tungstenoksit tabakasını meydana getirmektedir. Bu tabaka kaplamanın korozyon direncini arttırmaktadır. Ayrıca ısıtılmanın sonucu oluşan Ni_2B and Ni_3B çökeltileri de nikel fazı ile mikro-galvanik hücrelerin oluşmasına neden olmaktadır ki bu da korozyon direncine olumlu katkıda bulunmaktadır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada çelik malzemenin yüzeyi, akımsız Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplama ile kaplanmıştır. Kaplamaların bir kısmı 450 °C de bir saat ısıtılma tabi tutulmuştur. Isıtılmanın görmemiş ve görmüş Ni-B ve Ni-B/Ni-B-W kaplamaların iç yapısı, yüzey morfolojisi ve kesit görüntüleri incelenmiştir. İnceleme sonucu Ni-B/Ni-B-W kaplamasının da yüzeye çok iyi bir adeziv bağ ile gözeneksiz bir şekilde bağlandığı görülmüştür. EDS analizleri sonucu kaplamada %0,62 tungstenin (W) varlığı tespit edilmiştir. XRD analizleri sonucu Ni-B/Ni-B-W kaplamanın amorf yapıda olduğu, uygulanan ısıtılma ile kaplamanın kristalleştiği ve Ni_2B and Ni_3B çökeltilerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Isıtılmanın görmemiş ve görmüş Ni-B/Ni-B-W kaplamaların korozif karakterini incelemek için daldırma ve Potansiyometrik Polarizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucu her iki tür kaplamanın korozyon direncinin kaplanan malzeme olan çelikten daha yüksek olduğu görülmüştür. Isıtılmanın görmemiş Ni-B/Ni-B-W kaplamasının korozyon direnci Ni-B kaplamaya göre daha iyidir. Isıtılmanın

uygulanması sonucu her iki kaplamanın da korozyon direnci artmıştır. Ancak Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamasında bu artış Ni-B kaplamaya göre daha fazladır. Kaplamaya tungstenin eklenmesi ile ısıtma işlemi sonrası yüzeyde oluşturduğu koruyucu tungstenoksit tabakasından dolayı, kaplamanın korozyon direnci artmıştır. Gelecekte bu çalışma, farklı tavlama sıcaklıklarının Ni-B/Ni-B-W dubleks kaplamasına etkisini analiz etmek için geliştirilmesi düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi MYL-36421 no.lu Bilimsel Araştırma Proje (BAP) ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Mallory, G. O., Hajdu, J. B. (1990). Electroless Plating: Fundamentals and Applications. *American Electroplaters and Surface Finishers Society*, Florida, 1990.
- [2] Sahoo, P., Das, S.K. (2011). Tribology of Electroless Nickel Coatings a Review. *Material Design*, 32, 1760–1775.
- [3] Riedel, W. Electroless Nickel Plating. (1991). *ASM International Metals Park*, Ohio, USA.
- [4] Masoumi, F., Ghasemi, H. R., Ziaei, A. A., Shahriari, D. (2012). Tribological characterization of electroless Ni–10% P coatings at elevated test temperature under dry conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62, 1063–1070.
- [5] Bülbül, F. (2011). The Effects of Deposition Parameters on Surface Morphology and Crystallographic Orientation of Electroless Ni-B Coatings. *Metallic Materials*. 17, 67-75.
- [6] Das, S.K., Sahoo, P. (2010). Wear Performance Optimization of Electroless Ni-B Coating Using Taguchi Design of Experiments, *Tribology in industry*, Volume 32.
- [7] Correa, E., Zuleta, A.A., Guerra, L., Gomez, M.A., Castaño, J.G., Echeverría, F., Liu, H., Skeldon, P., Thompson, G.E. (2013). Tribological behaviour of electroless Ni–B coatings on magnesium and AZ91D alloy. *Wear*, 305, 115–123
- [8] Palaniappa, M., Seshadri, S.K. (2008). Friction and wear behavior of electroless Ni–P and Ni–W–P alloy coatings. *Wear*, 265, 735–740.
- [9] Yan, Y., Huo, Y., Sun, Z., Xu, Z. (2011). Preparation of Electroless Ni-P Composite Coating and Its Tribological Properties, *Advanced Materials Research*, 199-200, 696-699.
- [10] Véronique, V., Abdoul-Fatah, K., Adeline, S., Fabienne, D. (2012). Tribological characterization of electroless nickel-boron coatings, *Advanced Materials Research*, 409, 808-813.
- [11] He, M., Hu, W., Zhang, C., Weng, J., Shen, B., Wu, Y. (2012). Effect of Wear Conditions on Tribological Properties of Ni-P Coatings, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22, 2586–2592.
- [12] Nava, D., Hernandez, A.M., Manriquez, F., Meas, Y., Borges, R.O., Perez, J.J., Trejo, G. (2013). Effects of Heat Treatment on the Tribological and Corrosion Properties of Electrodeposited Ni-P Alloys, *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 2670–2681.
- [13] Narayanan, T.S.N., Baskaran, I., Krishnaveni, K., Parthiban, S. (2006). Deposition of Electroless Ni-P Graded Coatings and Evaluation of Their Corrosion Resistance. *Surface and Coatings Technology*, 200, 3438-3445.
- [14] Zhang, W.X., He, J.G., Jiang, Z.H., Jiang, Q., Lian, J.S. (2007). Electroless Ni–P layer with a chromium-free pretreatment on AZ91D magnesium alloy. *Surface Coating Technology*, 201, 4594–4600.

- [15] Hu, X., Jiang, P., Wan, J., Xu, Y. Xiaojun, (2009). Study of corrosion and friction reduction of electroless Ni-P coating with molybdenum disulfide nanoparticles. *Journal of Coating Technology Research*, 6 (2) 275–281.
- [16] Anik, M., Körpe, E., Sen, E. (2008). Effect of Coating Bath Composition on the Properties of Electroless Nickel-Boron Films, *Surface Coating Technology*, 202, 1718–1727.
- [17] Hamid, Z.A., Hassan, H.B., Attyia, A.M. (2010). Influence of Deposition Temperature and Heat Treatment on the Performance of Electroless Ni- B Films, *Surface Coating Technology*, 205, 2348–2354.
- [18] Oraon, B., Majundar, G., Ghjosh, B. (2008). Improving Hardness of Electroless Ni-B Coatings Using Optimized Deposition Conditions and Annealing, *Material Design*, 29, 1412–1418.
- [19] Delaunois, F., Lienard, P. (2002). Heat treatments for electroless nickel–boron plating on aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 160, 239-248.
- [20] Serin, I., Göksenli, A. (2013). Effect of Annealing Temperature on Hardness and Wear Resistance of Electroless Ni-B-Mo Coatings, *1st International Conference on Surface Engineering*, 2013 Busan, Korea.
- [21] Narayanan T., Stephan A., S. Guruskanthan S., Electroless Ni-Co-B Ternary Alloy Deposits: Preparation and Characteristics, *Surf. Coat. Technol.*, , 179, p 56–62.
- [22] Szczygiel, B., Turkiewicz, A., Serafinczul, J. (2004). Surface morphology and structure of Ni-P, Ni-P-ZrO₂, Ni-W-P, Ni-W-P-ZrO₂ coatings deposited by electroless method. *Surface Coating Technology*, 202, 1904–1910.
- [23] Kaya, B., Gülmez, T., Demirkol, M. (2008). Preparation and Properties of Electroless Ni-B and Ni-B Nanocomposite Coatings Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 *WCECS 2008, October 22 - 24, San Francisco, USA.*
- [24] Agarwala, R.C., Agarwala, V. (2003). Electroless Alloy/Composite Coatings: A Review. *Sadhana*, 28, 475-493.
- [25] Serin, I.S., Göksenli, A., Yüksel, B., Yildiz, R.A. (2015). Effect of Annealing Temperature on the Corrosion Resistance of Electroless Ni-B-Mo Coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 3032–3037.
- [26] Ziywan, S., Deping, W., Zhimin, D. (2006). Nanocrystalline Ni-B Coating Surface Strengthening Pure Copper. *Applied Surface Science*, 253, 1051–1054.
- [27] Zhao, C., Yao, Y. (2014). Preparation and Mechanical Properties of Electroless Nickel-Phosphorus-Tungsten Carbide Nanocomposite Coatings, *Journal of Material Engineering & Performance*, 23, 193–197.
- [28] Sharma, A., Singh, A.K. (2013). Electroless Ni-P and Ni-P-Al₂O₃ Nanocomposite Coatings and their Corrosion and Wear Resistance, *Journal of Material Engineering & Performance*, 22, 176–183.
- [29] Karthikeyan, S., Srinivasan, K.N., Vasudevan, T., John, S., Gopalan, A., Kalaignan, S. (2001). Characterisation of Nickel Phosphorus Silicon Carbide Composite Coatings, *Bulletin of Electrochemie.*, 17, 127–130.
- [30] Bai, Y., Chou, Y.H., Chao, C.L., Lee, S.J., Ger, M.D. (2008). Evaluation of Corrosion Resistance of Electroless Ni-P/Ni-W-P Double Layer Coatings on 6061 Aluminium Alloy, *Journal of Power Source*, 183, 174–181.
- [31] Chen, X., Li, G., Lian, J. (2008). Deposition of electroless Ni-P/Ni-W-P duplex coatings on AZ91D magnesium alloy, *Transaction of Nonferrous Metals Society China*, 18, 323-328.

- [32] Zhang, Z.H., Jiang, G.Y., Li, Q., Jiang, J.S. (2008). Electroless Ni-P/Ni-B duplex coatings for improving the hardness and the corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy,. *Applied Surface Science*, 254, 4949–4955.
- [33] Narayanan, T.S.N., Krishnaveni, K., Seshadri, S.K. (2003). Electroless Ni-P/Ni-B duplex coatings: preparation and evaluation of microhardness, wear and corrosion resistance, *Materials Chemistry and Physics* 82, 771–779.
- [34] Novak, M., Vojitech, D., Vitu, T. (2010). Influence of heat treatment on tribological properties of electroless Ni-P and Ni-P-Al₂O₃ coatings on Al-Si casting alloys. *Applied Surface Science*, 256, 2956-2960.
- [35] Contreras, A., Leon, C., Jimenez, O., Sosa, R., Perez, R. (2006). Electrochemical behavior and microstructural characterization of 1026 Ni-B coated steel. *Applied Surface Science*, 253, 592-599.
- [36] Steffani, P., Dini, J.W., Groza, J.R., Palazoglu, A. (1997). Electrodeposition and Corrosion Resistance of Ni-B-W Coatings,. *Journal of Material Engineering Performance*, 6, 413–416.
- [37] Drovosekov, A., Ivanov, M., Krutskikh, V., Lubnin, E., Polukarov, Y. (2005). Chemically Deposited Ni-W-B Coatings: Composition, Structure, and Properties, *Prot. Metals*, 41, 55–62.
- [38] Zhang, W.X., Huang, N., He, J.G., Jiang, Z.H., Jiang, Q., Lian, J.S. (2007). Electroless deposition of Ni-W-P coating on AZ91D magnesium alloy. *Applied Surface Science*, 253, 5116–5121.
- [39] Aydeniz, A.İ., Göksenli, A., Dil G., Muhaffel, F., Calli, Ç., Yüksel, B. (2013). Electroless Ni-B-W Coatings for Improving Hardness, Wear and Corrosion Resistance. *Materials and technology*, 47, 803–806.
- [40] Chen, X, Li G, Lian J, (2008). Deposition of Electroless Ni-p/Ni-W-P Dublex Coatings on AZ 91D Magnesium Alloy. *Trans. Nonferrous Metarials Society China*, 18, 323-328.
- [41] Drovosekov, A., Ivanov, M., Krutskikh, V., Lubnin, E., Polukarov, Y. (2005). Chemically Deposited Ni-W-B Coatings: Composition, Structure, and Properties. *Prot. Metals*, 41, 55–62.
- [42] Song, J.Y., Yu, J. (2002). Residual stress measurements in electroless plated Ni-P films. *Thin Solid Films*, 415, 167-172.

Araştırma Makalesi - Research Article

Varyans Analizi (ANOVA) ve Kovaryans Analizi (ANCOVA) İle Deney Tasarımı: Bir Gıda İşletmesinin Tedarik Süresine Etki Eden Faktörlerin Belirlenmesi

Beyzanur Çayır Ervural^{1*}

Geliş / Received: 13/04/2020

Revize / Revised: 09/07/2020

Kabul / Accepted: 10/07/2020

ÖZ

Küreselleşme ile rekabet koşullarının giderek ağırlaştığı günümüz şartlarında işletmelerin varlıklarına devam edebilmesi etkin tedarik zinciri faaliyetleri ile mümkündür. İyi yönetilen bir ağ mekanizmasında, sipariş edilen ürünün doğru yer ve doğru zamanda teslim edilmesinin yanı sıra kaliteli, sürdürülebilir ve paydaşlarla doğrudan ilişkili etkin bir tedarik zinciri ağına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada bir gıda işletmesinin tedarik zinciri ağ yönetiminde tedarik süresine etki eden faktörler belirlenerek, etkin faktörlerin tedarik süresi ile ilişkisi araştırılmıştır. Buna göre varyans analizi (ANOVA) ve kovaryans analizi (ANCOVA) ile entegre bir deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Etkin faktör seviyeleri arasında farklılıkları görmek için Duncan ve Tukey testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre işletmenin tedarik zinciri performansı iyileştirilerek taktiksel ve stratejik seviyede kararlar alınmasına yardımcı olunması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Tedarik Süresi, Deney Tasarımı, ANOVA, ANCOVA

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: beyzanur.ervural@gidatarim.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-0861-052X>)

Endüstri Mühendisliği, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, 42080 Konya, Türkiye

Design of Experiment with Variance Analysis (ANOVA) and Covariance Analysis (ANCOVA): Determination of Effective Factors Affecting the Lead Time in a Food Company

ABSTRACT

In today's market environments, where globalization and competition conditions are getting harder, it is possible for companies to continue their existence with effective supply chain activities. In addition to delivering the ordered product at the right place and at the right time, a supply chain network that is directly related to stakeholders should be designed through a quality, sustainable and well-managed network mechanism. In supply chain network management, chain activities should be maintained by taking advantage and adapting to current, dynamic, and existing developments. In this study, the factors affecting lead time in a food company's supply chain network management were determined, and the relationship between effective factors and the lead time was investigated. Accordingly, an integrated design of experiment was conducted with analysis of variance (ANOVA) and analysis of covariance (ANCOVA), and the obtained results were compared to each other. Duncan and Tukey tests were used to see differences between levels of effective factors. According to the obtained results, it was aimed to improve the supply chain performance and aid the company in order to make decisions at the tactical and strategic levels.

Keywords- *Lead time, Design of experiment, ANOVA, ANCOVA*

I. GİRİŞ

Tedarik zinciri yönetimi, hammaddenin elde edilmesinden ürünün nihai müşteriye teslim edilmesine kadarki süreçte sistemde yer alan tedarikçi, üretici, perakendeci ve müşteriler arasındaki ürün, para, bilginin en iyi biçimde kontrol edilmesine dayanan bir yönetim bilimidir. Müşterinin istediği anda malzeme veya ürüne ulaşabilmesi ancak hammadde, yarı mamul veya ara malzemenin zamanında temin edilmesi ile mümkündür. Bu açıdan değerlendirildiğinde tedarik süresinin tedarik zinciri yönetiminde kritik öneme sahip olduğu görülmektedir. Tedarik zinciri hammaddenin nihai ürüne dönüşüne kadarki safhalarında yer alan müşteri, tedarikçi ve fabrika gibi zincir elemanlarıyla doğrudan ilişkilidir. Zincirdeki elemanların birinde meydana gelecek değişiklik/aksaklık tüm sistemi etkilemektedir. Bu sebeple sürecin en iyi şekilde düzenlenerek organize edilmesine, sistemin ve var olan kaynakların optimize edilmesine ihtiyaç vardır.

Tedarik zinciri yönetiminde en temel unsur müşteri memnuniyetinin karlılık ve kalite entegrasyonu ile birlikte sağlanmasıdır. Buradan yalnızca kaliteli ürün üretmenin yeterli olmadığı anlaşılmakta ve müşteriye ürünün ne zaman, nereye, nasıl, ve ne miktarda ulaştırılacağına koşulları etkin biçimde incelenmelidir. Bu aşamada tedarik zinciri yönetiminin geniş perspektiften değerlendirilmesi gerekmektedir. Çünkü işletmelere girdi sağlayarak son müşteriye ulaşan ve satış sonrası hizmetler sunan şirketlerin de tedarik zinciri ağına yer aldığı bilinen bir gerçektir. Tedarik zincirindeki her halkanın doğru biçimde koordine edilmesi sürecin bütününe kusursuz işleme yardımcı olmaktadır. Global Tedarik Zinciri Forumu'nda, tedarik zinciri yönetiminin aşamalarını şu şekilde kabul edilmiştir: 1) Müşteri İlişkileri Yönetimi (Customer Relationship Management) 2) Müşteri Hizmet Yönetimi (Customer Service Management) 3) Talep Yönetimi (Demand Management) 4) Sipariş İşleme (Order Fulfillment) 5) İmalat Akış Yönetimi (Manufacturing Flow Management) 6) Satın alma (Procurement) 7) Ürün Geliştirme ve Ticarileştirme (Product Development and Commercialization) 8) İadeler (Returns). Tedarik zincirini doğru biçimde yönetmenin firmalara sağlayacağı pek çok yarardan söz edilebilir. Bu yararlar Tedarik Zinciri Konseyi (Supply Chain Council) tarafından şu şekilde özetlenebilir: Tedarik ağı boyunca verimliliğin artması, maliyetin azalması, çevrim sürelerinin kısalması, stok miktarı ve maliyetinin düşmesi, teslim politikalarında iyileşme, doğru tahmin kabiliyeti ve verimlilik/kapasite artışının sağlanmasıdır.

Etkin yürütülen tedarik zinciri politikası ile zincirdeki paydaşlar arasındaki koordinasyon sayesinde ortaya çıkabilecek belirsizlikler önlenecek ve bu sayede fazla stok ortaya çıktığında oluşacak maliyetlerin önüne geçilecektir. Ayrıca zincirdeki güçlü işbirliği ve doğru iletişim sayesinde karşılıklı güven oluşacak dolayısıyla ortaya çıkabilecek riskler paylaşılarak yeni başarılı işler ortaya konacaktır. Yeni ürün tasarımı, yeni ürünün piyasaya hızlı girişinin sağlanması gibi bir takım yenilikler firmalara avantaj sağlayacaktır. Bu sayede müşteri memnuniyeti sağlanarak firmalar için kazanç artışı, gereksiz stok yatırımının önlenmesi, yeni ürün geliştirme faaliyetlerinin artışı ve müşteriye hızlı yanıt verme süresi ile büyük kazanımlar elde edilecektir. Görüldüğü gibi rekabetin yalnızca rakip firmalar arasında olmadığı, tedarik sürecine katılan tüm paydaşlar arasında tedarik zincirindeki uyumluluğun ve tutarlılığın sağlanması, akışın bozulmaması açısından söz konusu olmaktadır [1]. Aksi takdirde tedarik ağı süreci sıkıntıya gireceği için müşteri ve prestij kayıpları söz konusu olacağından rakip firmalar avantaj sağlayacaktır. Bunun önüne geçilmesi için zincirde yer alan tüm unsurların uyumluluk içinde faaliyet göstermesi her an değişikliklere yanıt verebilecek güç ve altyapıda olması gerekmektedir.

Bu çalışmada bir gıda şirketinin tedarik zinciri faaliyetleri kapsamında tedarik süresine etki eden faktörler belirlenerek teslim süresinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. İşletmeler için teslim süresi hayati önem taşımaktadır. Müşteriye hızlı yanıt verebilme müşteri memnuniyetinin yansırı özellikle raf ömrü kısa, hızlı bozulabilen gıda ürünlerinde zaman yönetimi açısından önemlidir. Aksi durumda hem müşteri kaybı hem de ürün kaybı söz konusu olacaktır. Çalışmada ANOVA ve ANCOVA yöntemlerinin deney tasarımı ile entegre edilerek tedarik süresinin belirlenmesinde iki aşamalı istatistiksel metot kullanılması hem uygulama alanı hem de yöntemsel olarak literatüre katkı sağlamaktadır. Çalışmada, tedarik süresine etki eden faktörler belirlenerek işletmenin taktiksel ve stratejik seviyede karar almasına yardımcı olunmaktadır. Bu sayede şirketin uzun vadede ayakta kalması desteklenmekte ve rakiplerine karşı izleyeceği politikaların şekillenmesine katkı sağlanmaktadır.

Çalışmanın izleyen bölümünde tedarik zinciri yönetimi ile ilgili literatür araştırması sunulmuş ardından üçüncü kısımda tedarik zinciri yönetiminin gelişimi anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan deney tasarımı, varyans analizi ve kovaryans analizi yöntemleri açıklanmıştır. Beşinci kısımda, bir gıda işletmesi

için tedarik süresi varyans analizi ve kovaryans analizi yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Altıncı bölümde yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son olarak yedinci bölümde, sonuçlar ve gelecek araştırmalar için öneriler paylaşılmıştır

II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tedarik zinciri yönetimiyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar şu şekilde sunulabilir: Perçin [2] çalışmasında bilgi teknolojileri ile tedarik zincirinin zamana dayanan performansını değerlendirmiş ve buna göre Türk otomotiv yan sanayisinin performansını ölçmek için bir model geliştirmiştir. Elde edilen model sonucuna göre firmaların bilgi teknolojileri ve süreç geliştirme yöntemlerinin tedarik zinciri zamana dayalı performans ölçütü üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Yayla ve Hartomacıoğlu [3] seramik sektöründe faaliyet gösteren tedarikçileri değerlendirmek için eş zamanlı mühendislik metodunun kullanım etkinliğine göre faktör analizi yardımıyla yapay sinir ağları ile süreci analiz etmişlerdir. Yangınlar [4] turizm sektöründe tedarikçi seçim kriterlerini belirleyerek işletmeler arasında istatistiksel açıdan bir farklılık olup olmadığını tespit etmiştir. Aytekin ve Özcan [5] nitelikli elektronik sertifika tedarik başvuru çevrim süreleri açısından ANOVA ile performansları değerlendirilmiştir. Yang ve diğ. [6] çevrimiçi doğrudan kanaldaki çift kanallı bir tedarik zincirindeki teslim süresini analiz etmişlerdir. Yazarlar stok dışı kalma durumunda değişen müşteri davranışının teslim süresinin genişlemesinde Newsvendor modelini kullanmışlardır. Fu ve Yeh [7] bütünleşik üretici-satın alıcı tedarik zinciri teslim maliyeti ve taşıma süresinin etkisini değerlendirmiştir.

Schniederjans ve diğ. [8] çalışmalarında, bilgi yönetiminden yararlanarak gelecekteki tedarik zinciri araştırmasını geliştirmiştir. Böylece tedarik zinciri dijital performansını optimize etmek amacıyla hem literatür araştırması hem de endüstri ve saha uygulamaları üzerindeki tahminler ve metin araştırmalarını incelenmiştir. Munir ve diğ. [9], risk yönetiminin bilgi işleme ile birleşiminde operasyonel performansı iyileştirmek için tedarik zinciri entegrasyonu ve tedarik zinciri risk yönetimi arasındaki ilişkiyi araştırmaktadır. Böylece tedarik zinciri risk yönetimi tarafından yönetilen aracı rolü kovaryans tabanlı yapısal eşitlik modellemesi kullanarak işletmenin operasyonel performansı ve tedarik zinciri entegrasyonu ile araştırılmıştır. Chen ve diğ. [10], son kullanıcıları mutlu etmek ve satışları teşvik etmek için hizmet seviyesine bağlı tedarikçi ve perakendeciden oluşan bir tedarik zinciri ağını ele almaktadır. Yüksek talep oynaklığından kaynaklanan kayıpları azaltmak için, perakendeci alımları tedarikçiden ilk siparişini ayarlama seçenekleri koymaktadır. Çalışmada tedarik zinciri modelleri hem satış sözleşmesi hem de hizmet seviyesi kısıtını kapsayacak şekilde genişletilmiş ve uygun üretim politikalarının yanı sıra en uygun sipariş politikası değerlendirilmiştir. Hizmet seviyesi kısıtı altında en uygun sipariş ve üretim politikaları üretilmiştir. Helo ve Shamsuzzoha [11] çok şirketli proje ortamlarında tedarik zinciri yönetimi için ihtiyaçları ve gereklilikleri izleme teknolojileri ile değerlendirmiştir. Bu çalışma ayrıca lojistik ve tedarik zincirinin gerçek zamanlı izlenmesi için bulut tabanlı bir portalın pilot sistemini önermektedir. Bu portal, RFID, IoT ve blockchain teknolojisinin entegre bir gerçek zamanlı görünüme birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. RFID (Radyo Frekans Tanımlama) ve IoT (Nesnelerin İnterneti) gerçek zamanlı bilgi veya veri sağlarken, blok zincir teknolojisi değişmez işlemler zinciri sağlamak için kullanılmıştır. Roy ve diğ. [12] geliştirmekte olan bir ekonomide faaliyet gösteren giyim üreticilerinin sürdürülebilir öğrenme çabalarını araştırmaktadır. Hazır giyim üreticisi tarafından benimsenen farklı sürdürülebilir tedarik zinciri yönetim politikalarının çağdaş giyim tedarik zincirinin çevresel ve operasyonel performanslarına nasıl katkıda bulunduğunu açıklanmaktadır. Noori-Daryan ve diğ. [13], çalışmalarında fiyat ve teslim süresinin müşteriler için önemli öncelikler arasında yer aldığını belirtmiş ve özellikle eczane endüstrisindeki pazar talebinin satış fiyatına ve teslim süresine duyarlı olduğunu bildirmiştir. Bu açıdan çalışmada farmakolojik zincir üyeleri olarak çok uluslu, kapasite kısıtlı üreticiler dikkate alınmış ve tedarikçinin belirsizlik altında talepleri değerlendirilerek incelenmiştir.

Öztürk [14] tedarik zinciri yönetime etki eden faktörleri değerlendirmiştir. Bandy ve diğ.[15] teslim süresi değişikliğinin tedarik zinciri risk yönetimindeki performansına olan etkisini araştırmıştır. Stokastik teslim zamanlı model önceki deterministik modelin genişletilmiş halidir. Operasyonel metotlar ve finansal araçlar kullanılarak risk yönetim yaklaşımını entegre eden fiyat riskini ve talep belirsizliğini baz almaktadır. Elde edilen bulgulara göre teslim zamanı değişikliğinin tedarik zinciri performansına her zaman zarar vermediği ortaya çıkmıştır. Yalnızca yüksek seviyeli teslim zamanı değişikliğinde koordineli tedarik zincirine ihtiyaç olmuştur.

Literatür incelendiğinde tedarik zinciri çalışmalarının farklı kapsamlarda değerlendirildiği çoğunlukla da tedarikçi tercihlerine odaklanıldığı gözlenmektedir. Bu çalışma, literatürden farklı olarak tedarik süresine etki eden parametreleri ayrıntılı biçimde değerlendirmekte buna göre varyans analizi (ANOVA) ve kovaryans analizi (ANCOVA) yapılarak bir deney tasarımı planlanmaktadır. Etkin faktörlerin seviyeleri arasında farklılıkları görmek için Duncan ve Tukey çoklu aralık testleri uygulanmıştır.

III. TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİNİN GELİŞİMİ

Tedarik zinciri yönetimindeki gelişmeler takip edildiğinde öncelikle taktiksel ve operasyonel seviyede gelişmeler söz konusu iken değişen pazar koşulları gereği stratejik yaklaşımlar geliştirilerek tedarik zinciri stratejilerine geçilmiştir. Tedarik zinciri yönetimi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde 1960'lı yıllarda sürecin başladığı gözlenmiştir. Tedarik zinciri yönetiminin ilk aşaması olarak kabul edilen fiziksel dağıtım aşaması Bowersox tarafından kanal-içi bütünlük yaklaşımının firmalara rekabet üstünlüğü sağlayacağını ifade etmiştir [16].

1970'lerde Malzeme İhtiyaç Planlaması sisteminin ortaya çıkmasıyla maliyet, kalite yeni ürün geliştirme ve dağıtım faaliyetlerinde tedarik sürelerinin önemi dikkat çekmiştir. Pazarlama, üretim ve finans kısmıyla ilgili süreç içi faaliyetlerin yürütülmesinde sistematik lojistik yönetimi ile idare edilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Buna göre bütüncül bir yaklaşımla depolama, taşıma ve müşteri hizmetleri birleştirilerek tedarik zinciri yönetiminin fiziksel dağıtım yönetimi aşamasına geçilmiştir [17].

1980'lerden itibaren müşteri odaklılık ve pazara yönelik faaliyetler önem kazanmış, tedarik zinciri yönetiminin ikinci aşaması olarak ifade edilen lojistiğin sistemle bütünlüştürülmesi aşamasına geçilmiştir [17]. 1990'larda rekabet koşullarının zorlaşmasıyla sadece müşteri beklentilerini karşılamanın yeterli olmadığı, ürünlerin müşteriye tam zamanında, doğru miktarda ve düşük maliyetle ulaştırmanın gerekliliği anlaşılmıştır. Ürünü temin eden aracı tedarikçilerden başlayıp ürünü nihai müşteriye teslim eden işletmelere kadarki tüm süreçte tedarik ağı bütünün birlikte yönetilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Böylece tedarik zinciri yönetim aşaması oluşmuştur [18]. Lojistik faaliyetlerinin de aktif biçimde zincir faaliyetlerine dahil edilmesiyle günümüz tedarik zinciri yönetimi oluşmuştur.

Bilgi teknolojilerinin ve internetin hızlı gelişimiyle tedarik zinciri yönetimine internet tabanlı e-ticaret ve e-tedarik gibi gerçek zamanlı talep kontrolü, sipariş verme, müşteri hizmetleri ve stok yönetimi gibi uygulamalar eklenmiş böylece E-Tedarik Zinciri Yönetim aşaması oluşmuştur [19].

IV. YÖNTEM

Bu kısımda çalışmada kullanılan Deney Tasarımı, ANOVA ve ANCOVA yöntemleri açıklanarak yöntemlerin uygulama aşamaları gösterilmiştir.

A. Deney Tasarımı

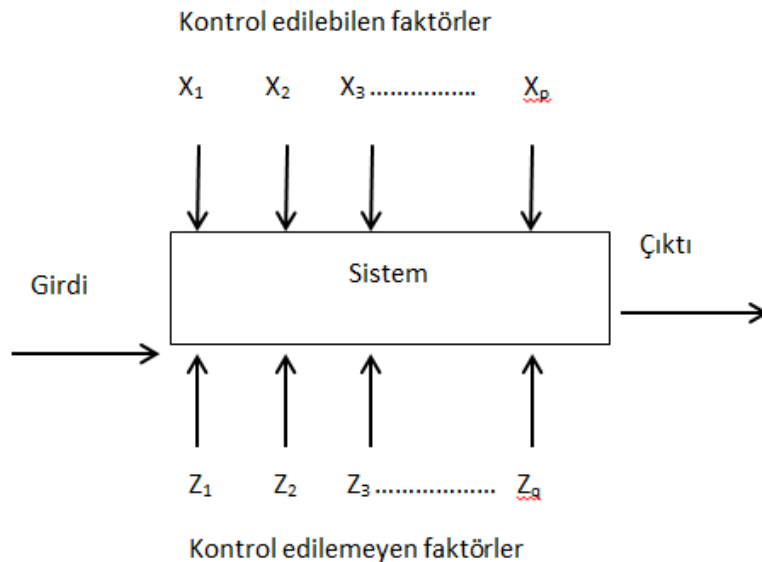
Deney tasarımı, bir sürecin performansına etki eden parametrelerin sistematik bir yaklaşımla değerlendirilerek çıktının iyileşmesine yardımcı olan istatistiksel bir yaklaşımdır [20]. Deney tasarımında, problemde yer alan faktörler, faktör seviyeleri, problemin çıktı değişkeni ve hazırlanan deneysel çalışmanın uygun bir analiz metoduyla belirlenmesi gerekmektedir. Deney tasarımı bir sürecin optimizasyonunda, süreçte yer alan değişkenliğin azaltılmasının tespit edilmesinde önemlidir.

Deney tasarımı, özellikle bir sistem sürecinin iyileştirilmesi, kalite kontrolünün sağlanması ve sistem performansının artırılmasında etkili rol oynamaktadır. Şekil 1'de bir sistem süreci genel biçimiyle sunulmuştur. Burada girdi ve çıktı değişkenlerin yanı sıra sistemde kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörler yer almaktadır. Buna göre sistemde kontrol edilemeyen değişken etkisi en aza indirgenerek süreç performansı iyileştirilmeye çalışılmaktadır.

İstatistiksel deney tasarımı yöntemleri tam faktöriyel tasarım, kesirli faktöriyel tasarım ve taguchi metodu gibi farklı yöntemlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada tam faktöriyel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Birden fazla faktör olduğunda faktöriyel tasarım kullanılmaktadır. Tam faktöriyel deney tasarımında en az iki

veya daha fazla faktör ve faktör seviyesinin yer aldığı deneylerde tüm faktör ve seviyeleri çarpılarak kombinasyonlar deneyerek en uygun parametre seti araştırılır, böylece hangi faktörün hangi seviyede olması gerektiği belirlenerek süreçteki optimum koşullar sağlanmaktadır. Tam faktöriyel deney tasarımı Varyans analizi ve regresyon analizleriyle birleştirilerek değerlendirilmektedir. Böylece hangi faktörün ilgili süreçte etkili olduğu araştırılarak faktörün deney üzerindeki etkisi hesaplanabilmektedir [21].

Doğru planlanmış bir deney tasarımı ile zaman, kaynak ve bütçe tasarrufu yapılarak etkin sonuçlar elde edilebilmektedir. Deney tasarımı yapılırken üç temel varsayımın sağlanması gerekmektedir bunlar rassallık, tekrarlar ve bloklama özellikleridir. Rassallık yapılacak deneylerin rasgele bir biçimde birbirinden bağımsız biçimde olmasıdır. Böylece hata oranı azaltılmaya çalışılır. Tekrarlar bir deneyin birden fazla sayıda yaparak doğru sonuç elde edilmesi sağlanmakta, deneysel hata oranı engellenmektedir. Bloklamada her blokta yer alan deneyler kendi içinde değerlendirilerek süreçte etkili başka faktörler varsa etkisinin azaltılması amaçlanmakta sadece ilgilenilen faktörün etkisi tespit edilmektedir. Tam faktöriyel deney tasarımında tam bloklama kullanılır, böylece bilinmeyen veya kontrol edilemeyen hataların deneyi etkilemesi önlenir. Bu temel varsayımlar altında hazırlanan deney tasarımı homojen, doğru ve tutarlı biçimde oluşturulmaktadır.



Şekil 1. Bir sistemin genel süreç yapısı [20]

B. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizi, iki farklı grup ortalamaları arasında fark olup olmadığını varyans kullanarak araştırarak istatistiksel bir yaklaşımdır. İki grubun karşılaştırılmasında kullanılan farklı yöntemler olsa da (Z veya T testi) en yaygın olanı F testi yani Varyans Analizi (ANOVA, Analysis of Variance) dir. İki gruptan fazla grubun önem seviyesi değerlendirilmek istediğinde aralarındaki farklılık sadece Varyans Analizi ile yapılabilmektedir.

Analizde yalnız ölçülebilen değişken etkileri araştırılıyorsa çoklu regresyon analizi, hem ölçülebilen hem de ölçülemeyen bağımsız değişkenlerin etkileri araştırılırsa kovaryans analizi yapılmaktadır. Ayrıca çoklu regresyon analizi ile de ölçülebilen ve ölçülemeyen değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisi, ölçülmeyen değişkenin “dummy” değişken olarak tanıtılmasıyla analize dahil edilir [22], [23]. Tek faktörlü varyans analizinde bir bağımsız değişken ve bir bağımlı değişken vardır. İki faktörlü varyans analizinde ise iki bağımsız değişken ve bir bağımlı değişken yer almaktadır. Burada temel amaç, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki ortak etkisinin araştırılmasıdır. Ayrıca, bağımsız her bir değişkenle ilgili grubun bağımlı

değişkene göre ortalamaları karşılaştırılarak ortalamalar arasındaki farkın anlam düzeylerine göre önemli olup olmadığı araştırılır.

Varyans analizinin uygulanabilmesi için örneklem ana kütlelerinin sahip olması gereken bazı özellikler bulunmaktadır. Her bir grubun normal dağılım sergilemesi, örneklerin bağımsız ve varyanslarının eşit olması istenmektedir. ANOVA analizinde kullanılan F testi hipotezi şöyle oluşturulur:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_N \text{ Ortalamalar arasında fark yoktur.}$$

$$H_1 : \text{Ortalamalar arasında en az iki arasında anlamlı bir fark vardır.}$$

Test İstatistiği

Varyans analizinde temel amaç, ikiden fazla örnek için örnek ortalamalarının genel ortalamadan sapmalarının kareler toplamını, sapmaya yol açan etkileri ayırmak ve analiz etmektir. İki faktörlü varyans analizi modeli şu şekilde gösterilmektedir:

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + e_{ijk} \quad (1)$$

burada μ , genel ortalamayı; α_i ilk faktör etkisini; β_j ikinci faktörün etkisini ve $\alpha\beta_{ij}$ ortak etkiyi ifade ederken, e_{ijk} hata terimini açıklamaktadır [24]. İki faktörlü varyans analizinde üç ayrı test işlemi yapılmaktadır.

1)Öncelikle, iki faktör bütün olarak anlamlı bir etkiye sahip mi bu durum incelenir. Burada açıklanabilen kareler toplamı dikkate alınarak F test değeri şu formülle hesaplanır:

$$F = \frac{(SS_x + SS_y + SS_{xy})/df_{x,y,xy}}{SS_{error}/df_{error}} = \frac{MS_{x,y,xy}}{MS_{error}} \quad (2)$$

burada, $SS_{x,y,xy}$ x, y ve ikili etkileşimini gösteren kareler toplamını (sum of squares), $MS_{x,y,xy}$ terimi, x, y ve ikili etkileşimini gösteren kareler ortalamasını (mean of squares), df (*degree of freedom*) serbestlik derecesini gösterir. Formülde yer alan SS_{error} , MS_{error} ve df_{error} hatalar için kareler toplamı, kareler ortalaması ve serbestlik derecesini ifade etmektedir.

$$df_{x,y,xy} = (N_x - 1) + (N_y - 1) + (N_x - 1)(N_y - 1) = N_x N_y - 1 \quad (3)$$

$$df_{error} = k - N_x N_y \quad (4)$$

burada, k örneklem sayısını ve N ilgili faktörün(değişkenin) düzeyini göstermektedir. F testine göre, anlamlı etkiye sahip olduğu sonucu çıkarsa x, y, xy'nin toplam etkisinin bağımlı değişken üzerinde bazı etkilerinden söz edilebilir.

2) Ardından ortak etkinin (interaction effect) anlamlılığı araştırılır. MS_{XY} ve MS_{error} arasındaki oran F değerini vermektedir. Ortak etki anlamlı ise faktörlerin birbirleri üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

3) Daha sonra her bir değişken ana etkisi (main effects) araştırılır. Sabit etkiler modeline göre F değerleri şöyle hesaplanır:

$$F_X = MS_x / MS_{error} \text{ ve } F_Y = MS_y / MS_{error} \quad (5)$$

Görüldüğü gibi iki faktörlü varyans analizi, bağımsız değişkenlerin her birinin ana etkisi ve ortak etkilerinin anlamlılığı test edilerek araştırmacılara büyük kolaylık sağlamak ve istatistiksel olarak geniş açıdan yorumlama kabiliyeti sunmaktadır.

ANOVA ve ANCOVA analizleri birbirleriyle yakından ilişkili konular olduğu için öncelikle ANOVA anlatılmış ardından ANCOVA yöntemi açıklanmıştır.

C. Kovaryans Analizi (ANCOVA)

Kovaryans analizi (ANCOVA- Analysis of Covariance), bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini araştıran, ayrıca bağımlı değişken ile ilişkisi bulunan ortak değişkenlerin (covariate) analiz edilmesinde kullanılan varyans analizi ile regresyon analizini birlikte değerlendiren istatistiksel bir yöntemdir. Kovaryans analizinde ortak değişkenden kaynaklanan etki çıkartılarak, bağımlı değişkendeki değişimin bağımsız değişkenle ilişkisi araştırılmaktadır [25]. ANCOVA gerekli koşullar sağlandığında varyans analizinin düşünüldüğü her yerde kullanılabilen güçlü bir istatistiksel metot olarak tanımlanmaktadır [26]. Kovaryans analizi ile varyans analizi arasındaki temel fark, bağımlı değişken ile ilişkili olan ve ANOVA’da belirlenen bağımsız değişkenlerden farklı olarak bir yada daha fazla değişkenin kovaryant değişken olarak analize katılmasıdır [27].

Kovaryans analizinde, öncelikle regresyon analizi uygulanır ardından varyans analizi gerçekleştirilerek bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki daha doğru ve tutarlı biçimde değerlendirilir. Böylece hata varyansı azaltılır, grup farklılıkları ortaya çıkartılır ve tip II hatanın da düşürülmesi sağlanır [25]. Hata varyansının azaltılmasıyla istatistiksel anlamda analizin gücü artırılmış olur. Literatür incelendiğinde ANCOVA kullanımıyla ilgili aşağıdaki koşullar sıralanmaktadır [28]:

- i) Regresyon analizinde grup içi dağılımın homojen olması
- ii) Bağımlı değişken ile ortak değişken arasındaki korelasyon katsayısının $R \geq 0,3$ olması
- iii) x ve y arasındaki ilişkinin doğrusal olmasıdır.

Kovaryans analizinde yer alan ortak değişkenin sürekli ve en az aralık ölçeğinde olması beklenmektedir. ANCOVA yapılırken önce grup içi regresyon eğilimi test edilir ardından düzeltilmiş grup ortalamaları test edilerek aralarında anlamlı farklılık olup olmadığı analiz edilir. Düzeltilmiş ortalamalar arasında anlamlı bir fark bulunması durumunda F testi uygulanarak farkın hangi gruplar arasında olduğu araştırılır. Kovaryans analizi yapılabilmesi için bazı varsayımların yerine gelmesi gerekmektedir. Bu varsayımlar şöyle özetlenebilir [25], [29]:

- Analizde değerlendirilen gruplar birbirinden bağımsız olmalıdır.
- Grupların bağımlı değişkene ait dağılımı normal dağılıma uygun olmalı ve varyansların homojenliği sağlanmalıdır.
- Analizde yer alan ortak değişken değeri aralıklı veya oransal veri kategorisinde olmalıdır.
- Birden fazla ortak değişken kullanımında çoklu doğrusallık (multicollinearity) olmamasına dikkat edilmelidir.
- Ortak değişken ve bağımlı değişken arasında doğrusal bir ilişki olmalıdır.

V. BİR GIDA İŞLETMESİNDE TEDARİK SÜRESİNİN ANOVA VE ANCOVA YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Tedarik zinciri yönetiminde, şirketler müşteri siparişlerini zincirleme iş anlaşmaları gereği istenen yer ve zamanda teslim etmek zorundadır. Bu çalışmada Türkiye'nin önemli gıda işletmelerinin birinde ortaya çıkan tedarik zinciri ağı yönetimindeki tedarik süresinin performansını etkileyen problemler değerlendirilmektedir. Buna göre işletmede yer alan lojistik ve tedarik zinciri departmanı tedarik süresini etkileyen faktörleri belirleyerek tedarik süresinin etkin biçimde değerlendirilmesini/iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, üretimde kullanılacak hammaddelerin temin süresi tedarik süresi olarak değerlendirilmektedir. Bu süreyi tedarikçi sınıfı, malzeme çeşidi ve parti büyüklüğü gibi pek çok faktör etkilemektedir. Problemden yer alan farklı faktörler ve faktörlerin seviyesi işletmenin tedarik zinciri performansını önemli ölçüde etkilemekte, problemin çözümünü güçleştirmektedir. Karmaşık yapıdaki bu tedarik zinciri ağı performansı problemine uygun çözüm elde etmek için istatistiksel yöntemlerin uygulanmasına ihtiyaç vardır. Ele alınan problemde öncelikle değişkenler açıklanmış ardından kullanılan hipotezler ve uygulanan yöntem anlatılmıştır.

D. Problem Tanımı, Model ve Değişkenler

Bu çalışmada yer alan etkin faktörler tedarik zinciri yönetimi departmanı ve satın alma biriminden alınan görüşler yardımıyla şu şekilde belirlenmiştir: Parti büyüklüğü, malzeme çeşidi, tedarikçiyle sözleşme imzalanması (yaptırım) ve işletmelerin puanlanması tedarik süresinin belirlenmesinde etkili faktörler olarak değerlendirilmiştir.

Ele alınan problemin çözümünde kullanılan faktör ve seviyeleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Faktör seviyeleri belirlenirken işletme ve problemin yapısıyla ilişkili uzman görüşlerinden ve literatürde kullanılan faktör seviyelerinden yararlanılmıştır. Buna göre biri kontrol değişken (ortak değişken-Covariate) olmak üzere üç bağımsız değişken ve bir bağımlı değişkenle deney tasarlanmış ve tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır.

Tablo 1. Tedarik süresinde etkili faktörler

Faktörler	Seviyeler			
	1	2	3	4
Malzeme Çeşidi	Un	Yağ	Şeker	Yumurta
Parti Büyüklüğü	Büyük	Orta	Küçük	-
Yaptırım	Var	Yok	-	-
Tedarikçi puanı	Sürekli değişken			

Değişkenler hakkında detaylı bilgi aşağıda verilmiştir. Bağımsız değişkenler parti büyüklüğü, malzeme çeşidi, yaptırım ve tedarikçi sınıfıdır. Kontrol değişkeni tedarikçi puanıdır. Bağımlı değişken ise tedarik süresi olarak belirlenmiştir.

Bağımsız Değişkenler

Malzeme Çeşidi: İşletme bir gıda firması olduğu için kullanılan ana malzemeler un, yağ, şeker ve yumurta şeklinde dört seviye olarak belirlenmiştir.

Parti Büyüklüğü: İşletme tedarikçilerden sipariş edilen malzemeleri büyük, orta ve küçük partiler halinde almaktadır. Parti büyüklüğü üç seviye olarak belirlenmiştir. Parti büyüklüğüne göre malzemelerin araca yüklenme süresi dolayısıyla tedarik süresi değişmektedir.

Yaptırım: İşletmenin sözleşme imzaladığı tedarikçilerle yaptıkları centilmenlik sözleşmesine göre ürün sipariş edildikten en geç 72 saat içinde firmaya ulaşması gerektiği şartı konulmuştur. Aksi durumda maddi yaptırım işleme konulacaktır. Buna göre işletmeyle imzalanan sözleşmeye göre yaptırımı olan ve olmayan şeklinde iki seviye belirlenmiştir.

Kontrol Değişkeni (Covariate)

Tedarikçi Puanı: Tedarikçilerin bazı kriterlere göre değerlendirilerek puanlanmasıdır. Bu kriterler ürünün tam ve/veya zamanında teslim edilmesi, acil sipariş durumunun gözetilip gözetilmemesi, kalite, ambalajlama, ürün sıcaklığı gibi kriterleri sağlayıp sağlamamalarına göre değerlendirilmektedir. Şirket tedarikçinin performans değerlendirmesinde üst üste aynı puan sınıflandırmasında olan tedarikçiyle çalışmayı durdurabilir. Tedarikçi puanı tedarikçinin sınıfını belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. Tedarikçi puanı, tedarik süresini etkileyen sürekli bir değişkendir.

Bağımlı Değişken

Tedarik Süresi: Çalışmada hedeflenen amaç yukarıda belirtilen faktörlere göre çıktı değişkeni olan tedarik süresinin belirlenmesidir. Bu sebeple tedarik süresi bağımlı değişkendir. Buna göre model hipotezleri aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

E. Hipotezler

İstatistiksel analizler için gerekli olan hipotezler aşağıda sunulmuştur:

F testi hipotezleri

H_0 : Amaç fonksiyonu değeri (tedarik süresi) parti büyüklüğü, malzeme çeşidi, yaptırım ve tedarikçi puanı parametrelerine bağlı olarak farklılık göstermez.

H_1 : Amaç fonksiyonu değeri parti büyüklüğü, malzeme çeşidi, tedarikçiyle imzalanan sözleşmenin varlığı ve tedarikçi puanı parametrelerine bağlı olarak farklılık gösterir.

Parti Büyüklüğü parametresi için F testi

$$H_0^1: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i$$

H_1^1 : tüm μ_i ler eşit değildir.

Malzeme Çeşidi parametresi için F testi

$$H_0^2: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i$$

H_1^2 : tüm μ_i ler eşit değildir.

Yaptırım parametresi için F testi

$$H_0^3: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i$$

H_1^3 : tüm μ_i ler eşit değildir.

Tedarikçi Puanı parametresi için F testi

$$H_0^4: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i$$

H_1^4 : tüm μ_i ler eşit değildir.

F. Yöntem

Tam faktöriyel deney tasarımı, probleme yönelik birden çok faktör ve faktör seviyesi olduğunda problem sonucu üzerindeki etkiyi araştıran bir yöntemdir. Ancak faktör ve seviye sayısı arttığında bu yöntem tüm kombinasyonları denediği için maliyetli ve zaman alıcı olabilir. Bu durumda kesirli çok etkenli (fractional factorial) deney tasarımı daha avantajlı olmaktadır. Bu çalışmada probleme yol açan faktörlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisi ve faktörlerin birbirleriyle etkileşimi tam faktöriyel deney tasarımı ile ölçülmektedir.

Deneyler üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Faktörlerin seviyeleri farklı olduğu için $(4*3*2)*3=72$ adet deney yapılmıştır. Yapılan deney tasarımı ile önce ANOVA uygulanmış ardından kontrol parametresinin bağımlı değişken üzerinde etkisini görmek ve ilişkinin açıklanabilirliğini artırmak için ANCOVA yapılmıştır. Buna göre, bağımlı değişkende etkisi olduğu düşünülen tedarikçi puanı kontrol faktörü (Covariate) olarak ele alındığında ANCOVA analizi ile, sadece bağımsız değişken olarak dikkate alındığında Varyans Analizi ile değerlendirilmiştir. ANCOVA analizinin daha açıklayıcı sonuçlar verdiği görülmüştür. Kovaryant değişkeninin hesaba katılması, ortalama hata karesini (*MSE*) genellikle düşürmektedir. Bu nedenle ANCOVA yönteminin kullanılması, istatistiksel gücün artırılması ve deneydeki yanlılığı azaltması bakımından ANOVA'ya göre avantaj sağlamaktadır [30].

ANOVA ve ANCOVA analizlerinin ardından ele alınan gruplar arasında anlamlı bir fark olup olmadığı *post hoc* testleri kullanılarak araştırılmıştır. *Duncan* ve *Tukey* testleri kullanılarak değişken seviyeleri arasındaki

farklılıklar incelenmiştir. Faktörlerin performans ölçütü üzerindeki etkisi incelenirken ana etki (main effect) ve kovaryant değişkenle ana etki faktörlerinin ikili etkileşimleri (interaction effect) göz önüne alınmıştır.

ANCOVA analizi sırasında ana faktörler ile kovaryant değişkenin ikili etkileşimleri göz önüne alındığında faktörlerden birinin kovaryant değişkenle arasında yüksek korelasyon tespit edilmiştir. Buna göre korelasyon tespit edilen tedarikçi sınıfı faktörü modelden çıkartılarak analize devam edilmiştir. Pearson korelasyon değerini gösteren korelasyon tablosu Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Korelasyon analizi

Correlations			
		Tedarikçi Sınıfı	tedarikci_puani
Tedarikçi Sınıfı	Pearson Correlation	1	,892**
	Sig. (2-tailed)		,000
	N	72	72
tedarikci_puani	Pearson Correlation	,892**	1
	Sig. (2-tailed)	,000	
	N	72	72

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

1) *Verilerin Toplanması:* Deneyler yapılırken deney tasarımı prensiplerine (tekrarlama, rassallık ve bloklama ilkeleri) uygun davranılmıştır.

2) *Verilerin Gözden Geçirilmesi:* Veriler değerlendirilirken eksik verilerin analizi için SPSS’te missing value analysis gerçekleştirilmiş ve eksik veri bulunmamıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Eksik veri analizi

Case Processing Summary						
	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
Sözleşme	72	100,0%	0	0,0%	72	100,0%
Parti	72	100,0%	0	0,0%	72	100,0%
Büyüklüğü	72	100,0%	0	0,0%	72	100,0%
tedarikci_puani	72	100,0%	0	0,0%	72	100,0%
Malzeme Türü	72	100,0%	0	0,0%	72	100,0%

Tablo 4’te uç noktalar (outlier-dışa düşen) en yüksek ve en düşük değerlerine göre buldukları gözlem sırasına göre verilmektedir.

Tablo 4. Uç değerler tablosu

Extreme Values ^a			Case Number	Value
tedarikci_puani				
tedarik_suresi	Highest	1	26	67
		2	50	66
		3	2	60
		4	51	48,00 ^b
	Lowest	1	4	30
		2	3	36
		3	28	38
		4	27	44
Hinhest	1	40	110	

3) *Varsayımların Gözden Geçirilmesi*: Kovaryans analizi için gereken varsayımlar şunlardır:

- Gruplar bağımsız olmalı, normal dağılıma uygun olmalı, varyansları eşit olmalıdır.
- Ayrıca, kontrol değişkeni (kovaryant) ve bağımlı değişken nicel verileri ölçmek için kullanılan aralıklı veya oransal veri şeklinde olmalıdır.
- Kovaryant değişkeni ile bağımlı değişken doğrusal bir ilişki göstermelidir.

Normal dağılıma uygunluk varsayımı

Verilerin normal dağılıma uygunluğu *Kolmogorov Smirnov* ve *Shapiro-Wilk* testi ile sınanmıştır. Her bir değişken ve seviyesi için hipotezler kurulmuş ve normallik testi yapılmıştır. Örneğin parti büyüklüğünde her üç seviye için tedarik sürelerinin normalliği aşağıda kurulan hipotezlerle sınanmaktadır.

Küçük parti büyüklüğü için hipotezler:

H_0 : %95 güvenle veriler normal dağılımlıdır.
 H_1 : %95 güvenle veriler normal dağılımlı değildir.

Orta parti büyüklüğü için hipotezler:

H_0 : %95 güvenle veriler normal dağılımlıdır.
 H_1 : %95 güvenle veriler normal dağılımlı değildir.

Büyük parti büyüklüğü için hipotezler:

H_0 : %95 güvenle veriler normal dağılımlıdır.
 H_1 : %95 güvenle veriler normal dağılımlı değildir.

Tablo 5. Parti büyüklüğü için normallik testi

Tests of Normality							
Parti Büyüklüğü	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk			
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.	
tedarik_su resi	Küçük	,149	24	,181	,940	24	,164
	Orta	,135	24	,200 [*]	,938	24	,146
	Büyük	,122	24	,200 [*]	,927	24	,082

*. This is a lower bound of the true significance.

Tablo 5'te görüldüğü gibi "*Shapiro-Wilk*" testinin önem derecesi 0.05' ten büyük olduğundan tüm seviyeler için H_0 hipotezleri kabul edilir. Yani tüm gruplar için "%95 güvenle veriler normal dağılır" denilmektedir.

Tablo 6. Sözleşme için normallik testi

Tests of Normality							
Sözleşme	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk			
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.	
tedarik_su resi	Var	,142	36	,063	,950	36	,108
	Yok	,148	36	,054	,933	36	,106

a. Lilliefors Significance Correction

Diğer değişkenler için de aynı şekilde hipotezler kurulup normallik testleri yapılmış ve tüm değişken seviyelerinin normal dağılıma uygunluk varsayımını sağladığı görülmüştür (Tablo 6-7).

Tablo 7. Malzeme türü için normallik testi

Tests of Normality							
Malzeme Türü	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk			
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.	
tedarik_su resi	Tahıl	,148	18	,200 [*]	,961	18	,621
	Şeker	,205	18	,054	,847	18	,088
	Yağ	,268	18	,061	,853	18	,070
	Yumurta	,227	18	,515	,903	18	,064

*. This is a lower bound of the true significance.

Varyansların eşitliği varsayımı

Varyansların eşitliği varsayımı *Levene* testi ile sınanmıştır.

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 \dots = \sigma_j^2 \quad (6)$$

H_1 : tüm σ_j^2 eşit değildir.

Tablo 8. Levene testi

Levene's Test of Equality of Error Variances ^a			
Dependent Variable: tedarik_suresi			
F	df1	df2	Sig.
,953	23	48	,537

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.
a. Design: parti_buy + yaptirim + MALZEME + tedarikci_puani

Tablo 8'de sunulan *Levene* testi sonucunda varyansların eşit olduğu varsayımı doğrulanmıştır ($p>0.05$).

VI. ANALİZ

Yapılan çalışmada öncelikle ANOVA analizi yapılarak hangi faktörlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu araştırılmıştır. Ardından etkin olan faktörlerin hangi grupları arasında anlamlı bir fark olduğunu araştırılmasında *Duncan* ve *Tukey* testleri uygulanmıştır. Daha sonra kovaryant etki dikkate alınarak ANCOVA yapılmıştır.

G. ANOVA

Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi test etmek için varyans analizi yapılmıştır.

Tablo 9. F Testi

Tests of Between-Subjects Effects					
Dependent Variable: tedarik_suresi					
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	400598,931 ^a	7	57228,419	387,401	,000
parti_buy	3057,194	2	1528,597	10,348	,000
yaptirim	2800,014	1	2800,014	18,954	,000
MALZEME	27374,375	3	9124,792	61,769	,000
Error	9602,069	65	147,724		
Total	410201,000	72			

a. R Squared = ,977 (Adjusted R Squared = ,974)

Tablo 9'a göre *F* istatistiği değerleri incelendiğinde parti büyüklüğü, yaptırım ve malzeme çeşidi faktörlerinin tedarik süresi üzerinde $\alpha=0.05$ düzeyinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu söylenmektedir. Buna göre H_0 hipotezleri red edilmektedir.

Etkin faktörlerin seviyeleri arasında farklılıkları görmek için *Duncan* ve *Tukey* çoklu aralık testleri uygulanmıştır. *Post hoc* testlerinde faktör seviyelerinin en az 3 olması gerekmektedir. Aşağıda faktör seviyesi üç ve dört olan faktörler (parti büyüklüğü ve malzeme türü) için *Duncan* ve *Tukey* test analizleri verilmiştir.

Tablo 10. Parti büyüklüğü için *Tukey-Duncan* testi

		tedarik_suresi			
Parti Büyüklüğü		N	Subset		
			1	2	3
Tukey HSD ^{a,b}	Küçük	24	63,5417		
	Orta	24	71,2500	71,2500	
	Büyük	24		79,5000	
	Sig.		,079	,056	
Duncan ^{a,b}	Küçük	24	63,5417		
	Orta	24		71,2500	
	Büyük	24			79,5000
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = 147,724.

Parti büyüklüğü küçük ve orta faktör seviyelerinin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olmadığı ayrıca orta ve büyük seviyeleri arasında da anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir (Tablo 10). *Duncan* testine göre ise parti büyüklüklerinin büyük, küçük ve orta seviyeleri için anlamlı fark olduğu görülmektedir. Ayrıca küçük partilerin tedarik süresinin daha kısa olduğu parti büyüklüğüne bağlı olarak tedarik süresinin uzadığı görülmektedir.

Tablo 11. Malzeme türü için *Tukey-Duncan* testi

		tedarik_suresi			
Malzeme Türü		N	Subset		
			1	2	3
Tukey HSD ^{a,b}	Yumurta	18	51,1667		
	Yağ	18	56,3889		
	Şeker	18		77,6667	
	Tahıl	18			100,5000
	Sig.		,573	1,000	1,000
Duncan ^{a,b}	Yumurta	18	51,1667		
	Yağ	18	56,3889		
	Şeker	18		77,6667	
	Tahıl	18			100,5000
	Sig.		,202	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = 147,724.

Malzeme türlerine göre yapılan *Tukey* ve *Duncan* testlerine göre yumurta ve yağ arasında anlamlı bir fark yoktur ancak şeker ve tahıl malzemeleri ve diğer seviyeler arasında anlamlı bir fark olduğu söylenebilir (Tablo 11).

H. ANCOVA

ANOVA analizinden sonra ANCOVA testi yapılarak çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tedarikçi puanı kontrol değişkeni (kovaryant) olarak eklenmiştir. Buna göre kontrol değişkeninin bağımlı değişken üzerindeki açıklanma derecesi tespit edilmeye çalışılmıştır.

Modele eklenen kontrol değişkeni ve bağımlı değişken doğrusal bir ilişki içinde olmalıdır. Bunu test etmek için iki değişken arasında korelasyon analizi yapılmıştır. Kontrol değişkeni ve bağımlı değişken arasındaki korelasyonun 0,30'dan yüksek olduğu durumlarda ANCOVA daha etkili olur. Tablo 12'de tedarik süresi ve tedarikçi puanı arasında anlamlı bir korelasyon tespit edildiği ve 0,3'ten yüksek olduğu görülmektedir. Daha güçlü doğrusal ilişki daha güçlü ANCOVA sonuçlarının elde edilmesini sağlamaktadır.

Tablo 12. Tedarikçi puanı ve tedarik süresi arasında Pearson korelasyon katsayı değeri

Correlations			
		tedarikci_pua ni	tedarik_sures i
tedarikci_puani	Pearson Correlation	1	,328**
	Sig. (2-tailed)		,005
	N	72	72
tedarik_suresi	Pearson Correlation	,328**	1
	Sig. (2-tailed)	,005	
	N	72	72

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Çalışmada tedarikçi puanı arttıkça tedarik süresinin düşeceği beklenildiğinden aralarındaki doğrusal ilişki sağlanmaktadır. Bu doğrusal ilişkinin sağlanmasında kovaryant değişkenine (1 / tedarikçi puanı) şeklinde matematiksel dönüşüm yapılarak ANCOVA varsayımına uyulmuştur.

Tablo 13. ANCOVA analiz tablosu

Tests of Between-Subjects Effects					
Dependent Variable: tedarik_suresi					
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	406189,890 ^a	8	50773,736	810,130	,000
parti_buy	3006,376	2	1503,188	23,984	,000
yapirim	1715,626	1	1715,626	27,374	,000
MALZEME	30017,844	3	10005,948	159,652	,000
tedarikci_puani	5590,959	1	5590,959	89,208	,000
Error	4011,110	64	62,674		
Total	410201,000	72			

a. R Squared = ,990 (Adjusted R Squared = ,989)

Tablo 13'e göre *F* istatistiği değerleri incelendiğinde parti büyüklüğü, yapırım ve malzeme çeşidi ve tedarikçi puanı faktörlerinin tedarik süresi üzerinde $\alpha=0.05$ düzeyinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu söylenmektedir. Buna göre H_0 hipotezleri red edilmektedir.

İ. ANOVA ve ANCOVA Analizlerinin Karşılaştırılması

Modele eklenen kovaryant değişkenin modelin açıklanabilirliği üzerinde etkisi olup olmadığı incelenmiştir. ANCOVA analizi yapılmadan önce ANOVA analizinden elde edilen *MSE* değeri 147,724'tür. Tedarikçi puanının kovaryant faktör olarak eklenmesi ve bu faktörün bağımlı değişkeni doğrudan etkilediği, *MSE* değerinin 62,674'e düşmesiyle görülmektedir. Ayrıca ANOVA testinde düzeltilmiş R^2 (*Adjusted R^2*) değeri 0,974 iken ANCOVA analizinden sonra düzeltilmiş R^2 değeri artarak 0,989'a çıkmıştır. Bu değer eklenen kontrol parametresinin modelin açıklanabilirliğine katkıda bulunduğunu göstermektedir.

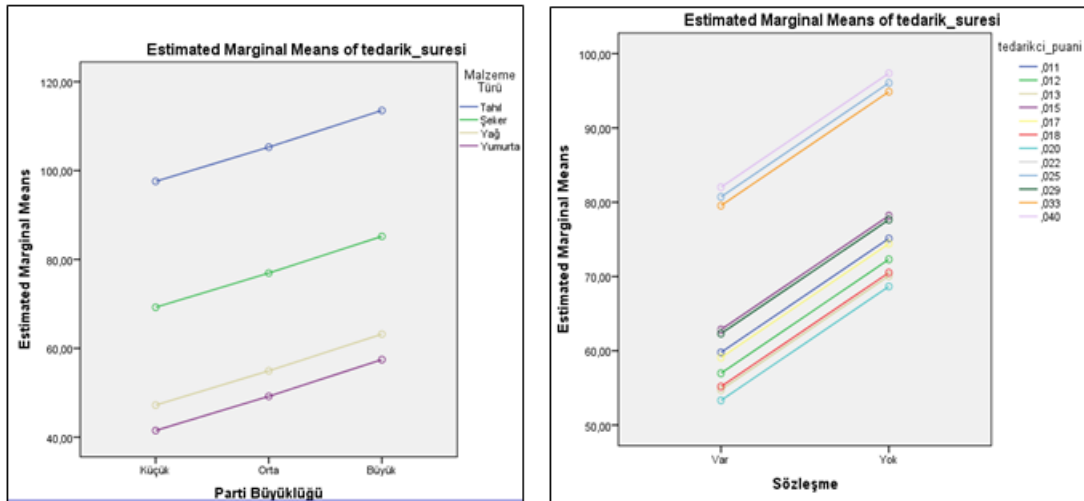
R^2 'deki değişimin anlamlılığını test etmek için aşağıdaki istatistik kullanılmıştır:

$$F = \frac{(R_2^2 - R_1^2)/(k_2 - k_1)}{(1 - R_2^2)/(n - k_2)} = \frac{(0,99 - 0,977)/(4 - 3)}{(1 - 0,99)/(72 - 4)} = 88,4 \quad (7)$$

$F_{tablo(1;68)}=3,98$. Dolayısıyla $F_{test} > F_{tablo}$ olduğu için H_0 reddedilir. Burada kovaryant etkisinin anlamlı olduğu görülmektedir. Kullanılan yöntemin tercih edilme nedeni açıklanırken aşağıdaki tespit vurgulanmıştır. Burada bu tespitin doğruluğu yeniden görülmektedir: “Kontrol değişkeninin etkilerinin hesaba katılması, hata kareler ortalamasını genellikle düşürmektedir. Bu nedenle ANCOVA yönteminin kullanılması, istatistiksel gücün artırılması ve deneydeki yanlılığı azaltması bakımından ANOVA’ya göre avantaj sağlar” [30].

Tablo 14’te ana etkilerin birbirlerinden bağımsız etkiye sahip olduğunu gösteren ana etkiler grafiği gösterilmektedir. Örneğin malzeme türü yumurta seçildiğinde parti büyüklüğü de küçükse tedarik süresinin en küçükleneceği görülmektedir. Ancak malzeme türü tahıl seçildiğinde ve parti büyük olduğunda tedarik süresinin uzayacağı görülmektedir. Ayrıca kontrol değişkeni olarak eklenen tedarikçi puanının parti büyüklüğü ve tedarik süresi faktörleriyle aralarında ilişki olmadığı görülmektedir. Kontrol değişkeni bağımsız değişkenlerden biriyle ilişkili olsaydı ANCOVA analizi doğru biçimde uygulanamaz, etkin sonuç sağlanmazdı.

Tablo 14. Değişkenler için ana etkiler modeli



VII. SONUÇ VE ÖNERİLER

Küreselleşmenin hızla yaşandığı günümüz rekabet ortamında firmaların ayakta kalabilmesi doğru biçimde planlanmış üretim, tedarik ve lojistik faaliyetleri ile mümkündür. Tedarik zincirinin etkin yönetimi, hem araştırmacılar hem de piyasada söz sahibi karar vericiler için önemli bir araştırma alanıdır. İşletmeler için en önemli amaç müşteri memnuniyetinin sağlanmasıdır. Tedarik süresinin kısalması ile müşteri ihtiyaçları hızlı biçimde karşılanarak müşteri memnuniyeti sağlanmaktadır. Tedarik zinciri ağ yönetimi bu karşılıklı memnuniyeti en büyüklerken maliyeti de en küçüklemeye çalışmaktadır. Oluşturulacak çözüm yöntemleri bazen birbirine paralel amaçların bazen birbiriyle çelişen amaçların optimizasyonunu gerektirmektedir.

Bu çalışmada amaç Türkiye’de faaliyet gösteren önemli bir gıda işletmesinin tedarik süresine etki eden faktörlerin incelenerek işletmede taktiksel ve stratejik seviyede karar alınmasına yardımcı olmaktır. Buna göre, tedarikçi sınıfı, malzeme türü, sipariş büyüklüğü ve yaptırım faktörleri bağımsız değişken olarak belirlenmiş ve tedarikçi puanı kovaryant değişkeni olarak ANCOVA’ya katılmıştır. Yapılan ANOVA ve ANCOVA analizleri ile bağımlı değişken ve bağımsız değişkenler arasında anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Anlamlı bir ilişki çıktığı için *Post Hoc* testleri ile farklı faktör seviyeleri arasındaki farklılık olup olmadığına bakılmıştır. ANCOVA analiziyle tedarikçi puanının model açıklanabilirliği üzerinde anlamlı bir etki yarattığı sonucuna

ulaşmaktadır. Böylece ANCOVA analizinde kurulan modelin istatistiksel anlamda daha güçlü ve etkin bir model olduğu gösterilmiştir.

Gelecek çalışmalar için örneklem büyüklüğü ve faktör sayısı artırılabilir. Ayrıca karar verme yöntemleri de kullanılarak daha kapsamlı bir analiz yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kehoe, D. & Boughton, N. (2001). Internet-based supply chain management A classification of approaches to manufacturing planning and control. *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 21, no. 4, pp. 516–524, doi: 10.1108/01443570110381417.
- [2] Selçuk, P. (2005). Tedarik Zincirinin Zamana Dayalı Performansının Ölçülmesi: Türk Otomotiv Yan Sanayi Uygulaması. *Ankara Üniversitesi SBF Derg.*, vol. 60, no. 3, p. 1, doi: 10.1501/SBFder_0000001434.
- [3] Yayla, A. Y. & Hartomacıoğlu, S. (2011). Tedarikçi Değerlendirme Sürecinde Yapay Sinir Ağlarının Kullanımı ve Sektörel Bir Uygulama.
- [4] Yangınlar, G.(2018).Tedarikçi Seçim Kriterlerinin Önemi. *Avrasya Sos. ve Ekon. Araştırmaları Derg.*, vol. 5, no. 8, pp. 236–250, Accessed: Apr. 12, 2020. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/asead/issue/41059/496335>.
- [5] Aytekin, F. G. & Özcan, B. (2020). Nitelikli Elektronik Sertifika (NES) Tedarik Sürecindeki Takımların ANOVA Metodu İle Performanslarının Değerlendirilmesi. *İleri Teknol. Bilim. Derg.*, vol. 6, no. 1, pp. 41–49, Accessed: Apr. 12, 2020. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/duzceitbd/issue/31760/286199>.
- [6] Yang, J. Q., Zhang, X. M., Fu, H. Y.& Liu, C.(2017). Inventory competition in a dual-channel supply chain with delivery lead time consideration. *Appl. Math. Model.*, vol. 42, pp. 675–692, doi: 10.1016/j.apm.2016.10.050.
- [7] Fu, Y. C. & Yeh, C. W. (2017). An integrated producer–buyer supply chain with delivery cost under stochastic transportation time. *Appl. Math. Model.*, vol. 44, pp. 676–687,doi: 10.1016/j.apm.2017.02.038.
- [8] Schniederjans, D. G., Curado, C. & Khalajhedayati, M. (2020). Supply chain digitisation trends: An integration of knowledge management. *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 220, p. 107439, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.07.012.
- [9] Munir, M., Jajja, M. S. S., Chatha, K. A. & Farooq S. (2020). Supply chain risk management and operational performance: The enabling role of supply chain integration. *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 227, p. 107667, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107667.
- [10] Chen, X., Luo, J., Wang, X. & Yang, D. (2020). Supply chain risk management considering put options and service level constraints. *Comput. Ind. Eng.*, vol. 140, p. 106228, doi: 10.1016/j.cie.2019.106228.
- [11] Helo P. & Shamsuzzoha, A. H. M. (2020). Real-time supply chain—A blockchain architecture for project deliveries. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 63, p. 101909, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101909.
- [12] Roy, V., Silvestre, B. S. & Singh, S.(2020). Reactive and proactive pathways to sustainable apparel supply chains: Manufacturer’s perspective on stakeholder salience and organizational learning toward responsible management. *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 227, p. 107672, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107672.
- [13] Noori-Daryan, M., Taleizadeh, A. A. & Jolai, F. (2019). Analyzing pricing, promised delivery lead time, supplier-selection, and ordering decisions of a multi-national supply chain under uncertain environment. *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 209, pp. 236–248, doi: 10.1016/j.ijpe.2017.12.019.

- [14] Öztürk, D. (2016). Tedarik Zinciri Yönetimi Süreçlerini Etkileyen Faktörler.
- [15] Bandalay, D. , Satir, A. & Shanker, L. (2016). Impact of lead time variability in supply chain risk management. *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 180, pp. 88–100, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.07.014.
- [16] Bowersox, D. J, La Londe, B. J. & Smykay, E. W. (1969). *Readings in physical distribution management; the logistics of marketing*. New York: Collier Macmillan Ltd.
- [17] Karasu, F. I. (2006). *Tedarik Zinciri Yönetiminin Yapısı ve İşleyişi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir.
- [18] Özdemir, A. İ. (2004). Tedarik zinciri yönetiminin gelişimi, süreçleri ve yararları. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, no. 23.
- [19] Lancioni, R. A., Smith, M. F. & Schau, H. J.(2003). Strategic Internet application trends in supply chain management. *Ind. Mark. Manag.*, vol. 32, no. 3, pp. 211–217, doi: 10.1016/S0019-8501(02)00264-X.
- [20] Montgomery, D. C. (2005). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- [21] Hamzaçebi ,C. & Kutay, F.(2003). Taguchi Metodu: Bir Uygulama. *Teknoloji*, vol. 6, no. 3–4, pp. 7–17.
- [22] Büyüköztürk, Ş. (1997). İki faktörlü varyans analizi. *Ankara Univ. Egit. Bilim. Fak. Derg.*, vol. 30, no. 1, pp. 001–018, doi: 10.1501/egifak_0000000272.
- [23] Nie, N. H.(1976). *Spss Statistical Package for the Social Sciences*, vol. 5, no. 1. Informa UK Limited.
- [24] Howell, D. (2007). *Statistical methods for psychology*. Brantford Ont.: Resource Services Library.
- [25] Selim, K. (2017). Kovaryans Analizi. *J. Mood Disord.*, vol. 7, no. 1, pp. 73–78, doi: 10.5455/jmood.20161230045344.
- [26] Ryan, J. M. & Hess, R. K. (1991). Handbook of statistical procedures and their computer applications to education and the behavioral sciences. New York: McMillian Publishing Company.
- [27] Howitt D. & Cramer, D. L. P. (1997). *An introduction to statistics in psychology*. London: Prentice Hall.
- [28] Frigon J.-Y. & Laurencelle, L. (1993). Analysis of Covariance: A Proposed Algorithm. *Educ. Psychol. Meas.*, vol. 53, no. 1, pp. 1–18, doi: 10.1177/0013164493053001001.
- [29] Şenoğlu, B. & Acıtaş, Ş.(2010). *İstatistiksel Deney Tasarımı Sabit Etkili Modeller*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- [30] Sahai, H. & Ageel, M. I.(2000). *The Analysis of Variance*. Boston, MA: Birkhäuser Boston.

Araştırma Makalesi - Research Article

Sediment Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Bakır ve Grafit Katot Elektrotların Kullanımı

Namık Ak¹, Ayhan Orhan², Ahmet Erensoy³, Nurettin Çek^{4*}

Geliş / Received: 18/04/2020

Kabul / Accepted: 01/07/2020

ÖZ

Mikrobiyal yakıt hücresi, elektrik enerjisinin mikroorganizmalar tarafından katalize edilen organik maddeler yoluyla üretildiği biyo-elektrokimyasal cihazlardır. Organik madde içeriği yüksek olan malzemelerden biri sedimenttir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde, organik malzeme kaynağı olarak sediment kullanılarak sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri imal edildi. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin sorunlarından biri olan düşük güç yoğunluğunu artırmak için yeni elektrotlar araştırılmaktadır. Bu çalışmada, aynı ortamdan alınan aynı özelliklere sahip sediment malzeme, eşit miktarlarda, aynı özelliklere sahip iki ayrı plastik kutuya yerleştirildi. Kutuların birine grafit anot ve grafit katot elektrotlar yerleştirildi ve G-G MYH olarak adlandırıldı. Diğer kutuya grafit anot ve bakır katot elektrotlar yerleştirildi ve G-Cu MYH olarak adlandırıldı. Burada amaç, grafit ile bakır katot elektrotların farklarını tespit etmek ve sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunluğunu arttırmaktır. Deneyle sonuçlarına göre, G-Cu MYH ve G-G MYH'nin sağladıkları en yüksek güç yoğunlukları sırasıyla, 455.5 mW/m² ve 143 mW/m² olarak ölçüldü. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri için grafit katot malzemesi yerine bakır katot malzemesinin kullanımının daha doğru bir strateji olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Sediment, Mikrobiyal Yakıt Hücresi, Grafit, Bakır, Bakteri*

¹İletişim: namik.ak@istanbul.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9119-1567>)

Elektrik ve Enerji Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler MYO, İstanbul, Türkiye

²İletişim: ayorhan@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7648-2566>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elazığ, Türkiye

³İletişim: aerensoy@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6300-1105>)

Parazitoloji Bölümü, Fırat Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Elazığ, Türkiye

^{4*}Sorumlu yazar iletişim: nurettincek001@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6120-9228>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü mezunu, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elazığ, Türkiye

Use of Copper and Graphite Cathode Electrodes in the Sediment Microbial Fuel Cells

ABSTRACT

The microbial fuel cell is bio-electrochemical devices electrical energy generates through organic materials catalyzed by microorganisms. One of the materials with high organic material content is sediment. In the microbial fuel cells, sediment-based microbial fuel cells were manufactured using sediment as an organic material source. New electrodes are being explored to increase the low power density, one of the problems of sediment-based microbial fuel cells. In this study, the sediment material with the same properties taken from the same medium was placed in two separate plastic boxes with the same properties in equal amounts. In one of the boxes, graphite anode and graphite cathode electrodes were placed and called G-G MYH. Graphite anode and copper cathode electrodes were placed in the other box and were called G-Cu MYH. The aim here is to detect the differences of graphite and copper cathode electrodes and increase the power density of sediment-based microbial fuel cells. According to the results of the experiments, the highest power densities provided by G-Cu MYH and G-G MYH were measured as 455.5 mW/m² and 143 mW/m², respectively. It was understood that the use of copper cathode material instead of graphite cathode material for sediment based microbial fuel cells is a more correct strategy.

Keywords- *Sediment, Microbial Fuel Cell, Graphite, Copper, Bacteria*

I.GİRİŞ

Halen, sürdürülebilir enerji üretim teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanan sayısız araştırma çalışmaları devam etmektedir. Yenilenebilir, kendi kendine sürdürülebilir ve sıfır karbon ayak izi bırakan alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi esastır. Mikrobiyal yakıt hücresi, enerji üreten ve atık/atık suyun arıtılması sırasında kirletici maddeleri aynı anda temizleyen yeni bir yeşil teknolojidir [1-3].

Mikrobiyal yakıt hücresinin anot bölgesinde bulunan mikroorganizma, atık malzemenin organik içeriğini kullanarak protonları, elektronları ve çok düşük oranlarda karbondioksiti serbest bırakır. Üretilen protonlar (H^+) ve elektronlar (e^-) anottan katota gönderilir. Havadan alınan oksijen, anottan gelen protonlar ve elektronlar katotta birleşerek su açığa çıkarırlar. Bu süreçlerin neticesinde mikrobiyal yakıt hücreleri elektriksel güç üretmektedirler [1-6].

Mikrobiyal yakıt hücreleri temel olarak, anot bölgesi, katot bölgesi, proton değişim membranı ve elektrotlardan oluşmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin gelişmiş güç üretimi için yeni elektrotların geliştirilmesi için çalışmalar hızla devam etmektedir [1, 3, 5]. Yapılan çalışmaların çoğunda, mikroorganizmaların yüzeye kolay tutunmasına imkan tanıdığı için, biyoyumlu ve elektrokimyasal olarak inert oldukları için karbon fiber, karbon bez, karbon keçe, grafit gibi karbon yapıları elektrot malzemeleri kullanılmıştır. Ancak, son yıllarda yapılan araştırmalarda, görülmüş ki karbon yapıları elektrot malzemelerinin yerine metal yapıları elektrot malzemelerinin kullanımı mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç üretimini arttırmaktadır [1-6].

Son yıllarda büyük ilgi çeken mikrobiyal yakıt hücresi tiplerinden birisi de sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleridir. Diğer mikrobiyal yakıt hücrelerinin aksine sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde proton değişim membranı kullanılmaması, maliyetin ve iç direncin azaltılması bakımından önemli bir fayda sağlamaktadır [7, 8]. Lakin sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin düşük elektriksel güç üretimi onların kullanımını kısıtlayan ana unsurlardan biridir. Önceki çalışmalar incelendiğinde, sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç çıkışlarını arttırmak için düşük iç dirence sahip, elektrokimyasal olarak etkin elektrot malzemeleri kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır [7-9]. Metal yapıları malzemeler, karbon yapıları malzemelere göre daha düşük iç dirence, daha yüksek iletkenliğe ve daha yüksek elektrokimyasal potansiyele sahiptir [10]. Bu nedenle, sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde metal yapıları elektrotların kullanılması onların elektriksel güç çıkışlarının artmasına ve geliştirilmelerine katkı sağlayabilir.

Bu çalışmada, sürekli sulak olan bir tarladan temin edilen sediment malzemesi organik malzeme kaynağı olarak kullanılmış ve bu organik malzeme içerisinde grafit anot elektrot ile grafit katot elektrot kullanılarak G-G MYH imal edildi. Sonra, sediment malzeme içerisine grafit anot elektrot ile bakır katot elektrot yerleştirilerek G-Cu MYH imal edildi. Her iki tip sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrokimyasal, fizikokimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri belirlenmiş ve kıyaslanmıştır. Bu çalışmanın amacı, bakır katot elektrotu kullanarak sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç çıkışını arttırmaktır.

II.MATERYAL VE METOT

Aynı özelliklere sahip plastik kutunun (105x65x75 mm) en alt kısmındaki yatay zemine grafit silindir çubuk (80x130 mm) anot elektrot görevi görmesi için yerleştirilmiştir. Ardından, bu plastik kutu içerisine; açık hava koşullarında kurutulmuş, Elazığ İli Maden İlçesi Durmuştepe Köyündeki sürekli sulak olan bir tarladan 10 cm derinden temin edilen sediment malzeme kutunun yarısını kaplayacak şekilde (200 gram) konulmuştur. Sonra, bu tarlada mevcut olan doğal su, plastik kutunun diğer yarısını kaplayacak şekilde (200 mililitre) konulmuştur. Daha sonra, su katmanı içerisine, katot elektrot görevi görmesi için bir grafit silindir çubuk (80x130 mm) yerleştirilmiştir. Böylece grafit elektrotlu sediment mikrobiyal yakıt hücresi (G-G MYH) imal edilmiştir. Ağırlık ölçümleri için hassas tartı (KERN, PKS 360-3), su miktarı ölçümü için dereceli silindir kullanılmıştır.

Grafit elektrotlu mikrobiyal yakıt hücresinde yapılan işlemler bir kez daha tekrar edilmiş ancak katot elektrot olarak grafit değil de 99.9 saflıktaki bakır levha (50x40 mm) suyun içerisine yerleştirilerek, grafit anot ve bakır katot içeren sediment mikrobiyal yakıt hücresi (G-Cu MYH) imal edilmiştir.

Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot ve katot elektrotları arasındaki dış devre bağlantısı, önceki çalışmalarda olduğu gibi paslanmaz çelik tel ile yapılmıştır [11, 12]. Önceki çalışmalarda olduğu gibi anot

ve katot elektrotlara monte edilen çelik telin su ve diğer faktörlerden etkilenip hücre performansını etkilememesi için çelik tel epoksi malzeme ile kaplandı [12]. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin, elektrokimyasal özelliklerinden biri olan açık devre gerilimi dijital multimetre (UNI-T:UT61C) kullanılarak ölçüldü. Açık devre geriliminin sabit olduğu anda 0-1.000.000 ohm (Ω) dış direnç kullanılarak elde edilen değerler denklem 1'deki ohm kanununa uygulanarak kutuplaşma eğrileri ve güç değerleri elde edildi.

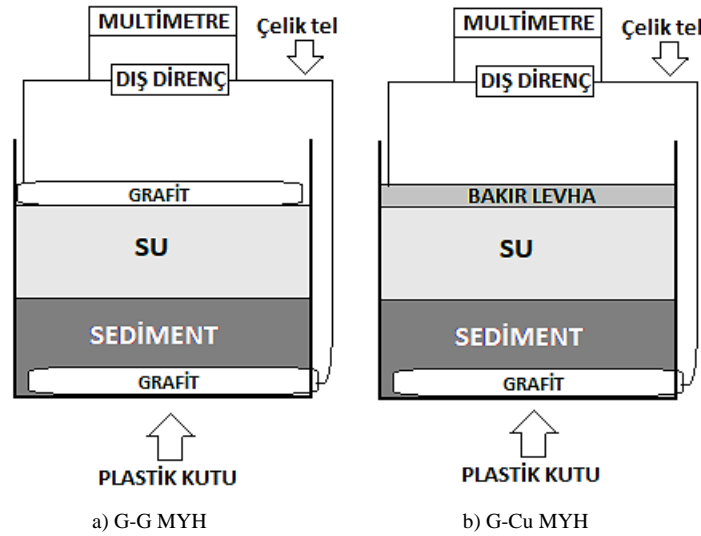
$$P = I \times V \quad (1)$$

Burada, P güç, I akım ve V gerilim olarak ifade edilmektedir. Güç yoğunluğu değerleri denklem (2) kullanılarak elde edildi.

$$P_d = P/S \quad (2)$$

Burada, P_d güç yoğunluğu, P güç ve S anot elektrotun geometrik yüzey alanını ifade etmektedir.

İmal edilen mikrobiyal yakıt hücrelerinin şematik diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



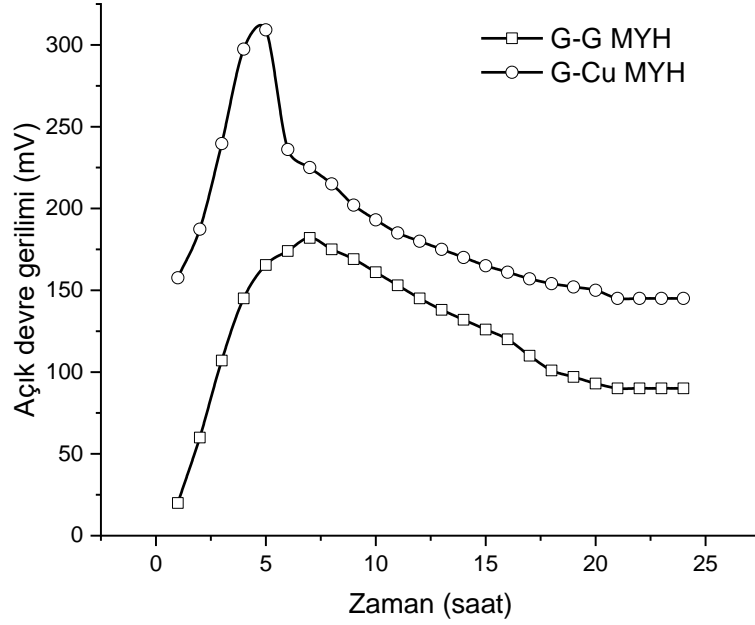
Şekil 1. Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinin şematik diyagramı

Deneylerin başında ve sonunda, fizikokimyasal özellikler (iletkenlik, özdirenç, toplam çözünmüş katı, tuzluluk, pH ve redoks potansiyeli), multiparametre cihazı (METTLER TOLEDO, Seven Excellence) kullanılarak tespit edilirken mikrobiyolojik yapılar optik mikroskop (SOIF, BK5000-TR/L) ile gözlemlendi.

III.BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Elektrokimyasal Performans

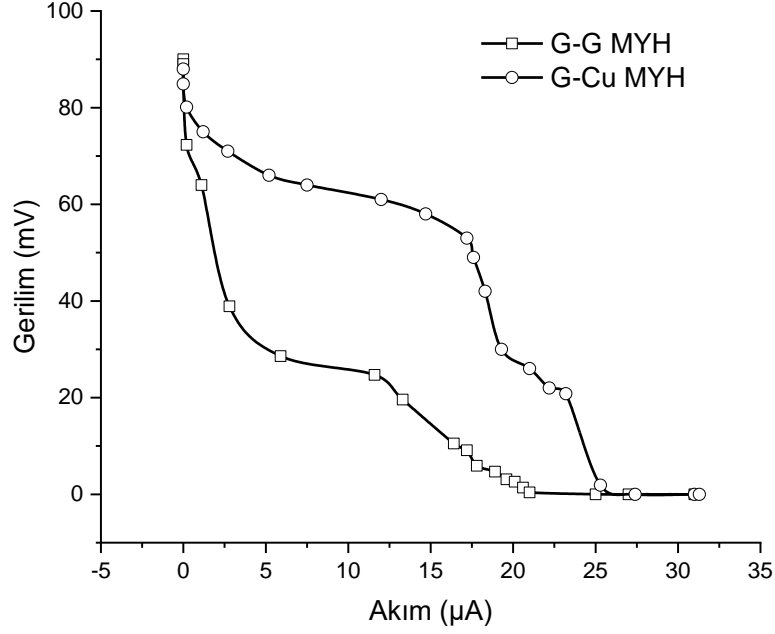
Mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrokimyasal performanslarını belirlemek için ilk önce zamana göre değişen açık devre gerilimleri (OCV) tespit edilmelidir. Çünkü bir mikrobiyal yakıt hücresindeki en yüksek hücre voltajı, açık devre voltajı (OCV) olarak adlandırılır ve OCV dış direncin sonsuz olduğu açık bir devrede elde edilmektedir [1-9]. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili yapılan bu çalışmada, dijital multimetre kullanılarak ölçülen açık devre gerilimleri (OCV) Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin zaman göre açık devre gerilimleri

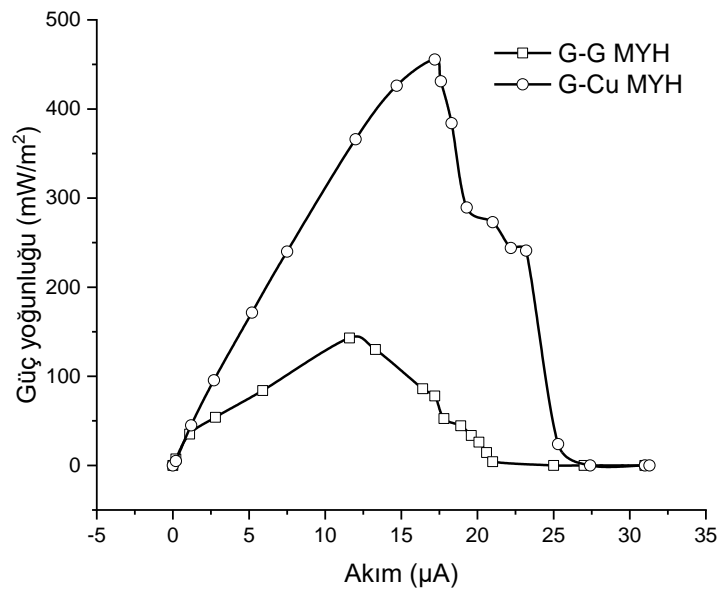
Şekil 2’de görüleceği üzere, grafit anot ve grafit katot elektrottan sediment mikrobiyal yakıt hücresi (G-G MYH) en yüksek 182 mV açık devre gerilimi üretmiştir. Grafit anot ve bakır katot elektrottan oluşan sediment mikrobiyal yakıt hücresi (G-Cu MYH) en yüksek 309,2 mV açık devre gerilimi üretmiştir. Burada dikkat çeken bir husus, G-Cu MYH’nin G-G MYH’ye kıyasla 1.69 kat daha yüksek OCV değeri üretmesidir. Grafit anot ve grafit katot elektrotların kullanıldığı sediment tipi mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, en yüksek $158 \pm 0,7$ mV değerinde OCV üretmiştir [7]. Şekil 2’deki verilere bakıldığında, bu çalışmadaki G-G MYH’nin ürettiği OCV değeri daha önceki çalışmalardan çok az yüksek olup daha önceki çalışmalar ile uyumludur. Buna ilaveten, sediment tipi mikrobiyal yakıt hücrelerinde titanyum-titanyum dioksit elektrotlar kullanılarak 193 mV OCV değeri elde edilmiştir [8]. G-Cu MYH, titanyum-titanyum dioksit elektrotlar kullanılan sediment mikrobiyal yakıt hücresine kıyasla 1.60 kat daha yüksek OCV değeri üretmiştir. Bu da sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücresinde bakır katotun, OCV sağlaması bakımından iyi bir katot elektrot malzemesi olduğunu açıkça gözler önüne sermektedir.

Kutuplaşma (polarizasyon) eğrileri bir mikrobiyal yakıt hücresinin elektrokimyasal performansını gösteren önemli parametrelerden biridir [1-9]. G-G MYH ve G-Cu MYH’nin kutuplaşma eğrileri sabit OCV değeri ürettikleri zaman diliminde $0-1.000.000 \Omega$ dış direnç kullanılarak tespit edildi. Bir dijital multimetre kullanılarak bu dış dirençler üzerinde gerilim (mV) ve akım (μA) değerleri ölçüldü ve sonuçlar Şekil 3’teki grafiklere yansıtıldı [1-9].



Şekil 3. G-G MYH ve G-Cu MYH'nin kutuplaşma eğrileri

Şekil 3'teki kutuplaşma eğrilerindeki gerilim ve akım değerleri denklem (1) ve denklem (2)'ye uygulanarak G-G MYH ve G-Cu MYH'nin elektriksel güç yoğunluğu hesaplandı [1-9]. G-G MYH ve G-Cu MYH'nin elektriksel güç yoğunluğu eğrileri Şekil 4'te mevcuttur.



Şekil 4. G-G MYH ve G-Cu MYH'nin güç yoğunluğu eğrileri

Şekil 4'te görüleceği üzere, G-G MYH en yüksek 143 mW/m² güç yoğunluğu sağlarken G-Cu MYH 455.5 mW/m² güç yoğunluğu sağlamıştır. Yani, G-Cu MYH G-G MYH'ye kıyasla 3.18 kat daha yüksek güç yoğunluğu sağlamaktadır. Sediment mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili daha önceki çalışmalarda, grafit elektrotlar kullanılarak 10.2 mW/m², titanyum-titanyum dioksit elektrotlar kullanılarak 187 mW/m² değerinde güç yoğunluğu sağlanmıştır [7, 8]. Bu çalışmadaki G-Cu MYH, en gelişmiş sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinden biri olan titanyum-titanyum dioksit elektrotlara sahip sediment mikrobiyal yakıt hücresinden 2.43 kat daha yüksek elektriksel güç yoğunluğu sağlamıştır [8]. Daha önceki çalışmalarla kıyaslandığında, sediment mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç çıkışlarını arttırmak için grafit, titanyum, titanyum oksit gibi malzemeler kullanmak yerine bakır katot malzemesinin kullanılmasının daha doğru bir strateji olduğu apaçık ortaya çıkmıştır.

B. Fizikokimyasal ve Mikrobiyolojik Özellikler

Bu çalışmada kullanılan sediment malzemesi Elazığ İli Maden ilçesin Durmuştepe Köyünde bulunan ve sürekli sulak olan bir tarladan temin edilmiştir. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerini etkileyen parametreleri tespit edebilmek için bu sediment malzemesinin fizikokimyasal özelliklerini tespit etmek şarttır. Bu çalışmadaki sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerine hiçbir kimyasal ön işlem uygulanmamış ve tamamen sedimentin kendi doğal ortamı kullanılmıştır. Sediment malzemesi ve onun temin edildiği ortamdaki su ile karışarak oluşan çamur sedimentin elektrik iletkenliği, öz direnç, toplam çözünmüş katı, tuzluluk, PH, redoks potansiyeli gibi fizikokimyasal özellikleri 20-25°C sıcaklıkta multiparametre cihazı kullanılarak ölçüldü. 20-25°C sıcaklıkta açık ortam koşullarında kurutulmuş sediment malzemesinin yoğunluğu plastik kap ve hassas terazi kullanılarak ölçüldü. Ölçüm sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

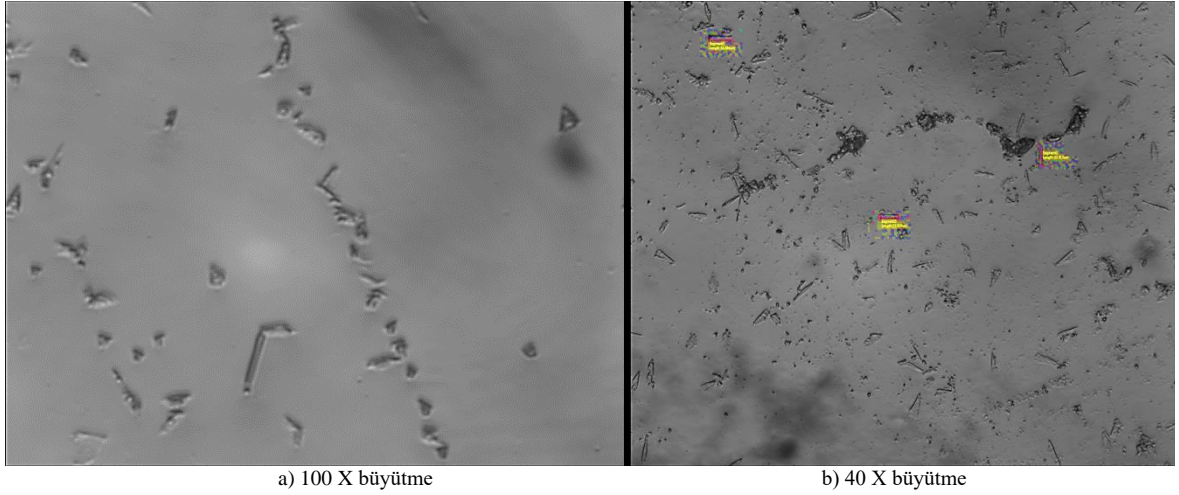
Tablo 1. Sediment malzemesinin fizikokimyasal özellikleri

Elektrik iletkenliği (µS/cm)	407±5
Özdirenç (Ωxcm)	2439.8±5
Toplam çözünmüş katı (mg/L)	163.6±3
Tuzluluk (ppt)	0.13±1
PH	7.40±0.02
Redoks potansiyeli (mV)	-5.8±0.01
Kuru kütle yoğunluğu (g/cm ³)	1.136±0.01

Önceki çalışmalarda sediment malzemenin, elektriksel iletkenliği 55-3780 µS/cm, PH değeri 6.91-9.4, toplam çözünmüş katı 120-1400 mg/L, tatlı sudaki tuzluluğu 0-0.5 ppt ve kuru kütle yoğunluğu en fazla 1.6 g/cm³ olarak ifade edilmiştir [13-16]. Tablo 1'deki verilerin önceki çalışmalarla uyumlu olduğu ve kullanılan sediment malzemesinin sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri için uygun bir organik malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Redoks potansiyeli (ORP), bir ortam veya sistemdeki oksitleyici ve indirgeyici koşulların hızlı ve ucuz bir ölçümüdür. ORP, kimyasal bir türün elektron alma ve azaltılma eğiliminin ölçüsüdür. Depolanan ve çalışmaya hazır sıvıdaki "potansiyel" elektrik enerjisidir. Bu potansiyel, su veya topraktaki oksitleyici veya indirgeyici koşulları belirlemek ve sudaki farklı çözünmüş metallerin durumlarını tahmin etmek için kullanılır. ORP, sedimentlerdeki mikrobiyal süreçlerin türleri veya kirlenmiş akiferlerdeki kirleticileri içeren tepkimeler ve aerobik veya anaerobik ortamların kimyası hakkında fikir vermektedir. Redoks potansiyelinin negatif olması ortamın anaerobik olduğunu gösterirken pozitif olması ortamın aerobik olduğunu göstermektedir [17, 18]. Bu çalışmadaki sedimentin redoks potansiyeli -5.8 mV değerinde olup negatiftir. Yani, sedimentte anaerobik ortam olduğu anlaşılmıştır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde özellikle, anot elektrot için anaerobik ortam gereklidir. Bu çalışmada kullanılan sediment malzemesi, mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot elektrotu için gerekli olan anaerobik ortamı sağlamaktadır.

Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan sediment malzemesi anaerobik ortam sağladığı için çeşitli anaerobik mikroorganizmaları da barındırmaktadır. Sediment malzemenin barındırdığı

mikroorganizmaları tespit etmek için optik mikroskop kullanıldı. Mikroskop kullanılarak elde edilen mikroorganizma görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Sedimentteki mikroorganizmaların mikroskop görüntüsü

Şekil 5'teki mikroskop görüntülerinden görüleceği üzere sediment malzemedeki sporlu, çubuk şekilli bir mikroorganizma cinsi olan *Clostridium* bakterileri yoğunluktadır. Önceki çalışmalarda ifade edildiği gibi bu çalışmadaki *Clostridium* bakterileri 1.6-20 µm uzunluğunda ve 0.5-2 µm genişliğindedir [19]. *Firmicutes* şubesinde yer alan *Clostridium* bakterilerinin, su kaynakları (nehir, göl, deniz vb.) ve toprakta yaşam alanı vardır. Sediment malzemenin ORP ölçümlerinde de görüldüğü gibi anaerobik bir ortamdır. Sediment, anaerobik sulak toprak ortamı olduğu için *Clostridium* bakterileri sediment ortamında yaşamaktadırlar. Ayrıca, sediment malzemenin PH değeri (7.40±0.02) *Clostridium* bakterilerinin yaşayabileceği değerler arasındadır [20, 21]. Ayrıca, önceki çalışmalarda belirtildiği gibi, *Firmicutes* şubesinde yer alan bakteriler mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokatalizör veya elektrikjen (elektrojen) olarak kullanılmaktadır [21]. Bu nedenle, bu çalışmadaki G-G MYH ve G-Cu MYH'lerde *Clostridium* bakterileri biyokatalizör olarak görev yapmaktadır. Biyokatalizör olarak görev yapan bakteriler, mikrobiyal yakıt hücrelerindeki organik malzemeyi ayrıştırarak organik malzemenin sahip olduğu elektrokimyasal enerjiyi elektronlar ve protonlar şeklinde açığa çıkarmaktadır. Bakteriler, anot yüzeyinde biyofilm tabakası oluşturarak elektronları anot elektrotta aktarmaktadırlar. Anot elektrotta ulaşan elektronlar, iletken dış devreyi kullanarak katot elektrotta göç ederler. Protonlar ise sedimentteki sıvı yapı olan elektrolit içerisinde katot elektrotta göç etmektedirler. Katot elektrotta; elektronlar, protonlar ve havadan alınan oksijen kimyasal tepkimeye girerek su oluştururlar. Bu işlemlerin sonucu olarak mikrobiyal yakıt hücreleri elektrik enerjisi üretmektedirler [23-25]. Bu işlemlerden anlaşılacağı üzere, elektriksel ve kimyasal etkileşimi elektronlar gerçekleştirmektedir [5, 26].

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sürekli sulak olan bir tarladan elde edilen sediment malzemesindeki elektrokimyasal enerjiyi; grafit anot-grafit katot elektrotlar kullanarak açığa çıkaran G-G MYH ve grafit anot-bakır katot elektrotlar kullanarak açığa çıkaran G-Cu MYH olmak üzere toplam 2 tip mikrobiyal yakıt hücresi imal edilmiştir. Sediment esaslı G-G MYH sayesinde en yüksek 143 mW/m² güç yoğunluğu elde edilirken sediment esaslı G-Cu MYH sayesinde 455.5 mW/m² güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot elektrot olarak bakır kullanımı elektriksel güç yoğunluğunu 3.18 kat arttırmıştır. İlave olarak, sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot elektrot olarak bakır kullanılması, OCV değerini 1.69 kat arttırmıştır. Bir biyoelektrik üretici olan sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin OCV ve güç yoğunluğunun artması daha sürdürülebilir, istikrarlı enerji üretimi ve tedariki için mikrobiyal yakıt hücrelerinden elektrik üretimi için yeni bir strateji sağladı ve bu da mikrobiyal yakıt hücrelerinin pratik uygulaması için büyük önem taşımaktadır. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde bakır katot elektrot kullanımı ile elektriksel güç yoğunluğunun

artması, uzaktan çevresel izleme aparatının çalışmasını desteklemek için sürdürülebilir bir güç olarak veya çevresel kirleticileri azaltmak için bir elektron kaynağı olarak kullanılabilir. Bu çalışmadaki sediment malzeme yapısında, *Firmicutes* şubesine ait olan *Clostridium* cinsi bakterileri barındırmaktadır. Bu bakteriler, sedimentteki organik malzemenin sakladığı elektrokimyasal enerjiyi kataliz tepkimeleri ile elektron ve proton şeklinde açığa çıkarmakta ve anot elektrot yüzeyinde oluşturduğu biyofilm tabakası ile anot elektrota aktarmaktadır. Bu nedenle, *Clostridium* cinsi bakteriler sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri için biyokatalizör görevi yapabilmektedirler. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin gelişmelerini sağlamak için elektrokimyasal olarak daha etkin mikroorganizmalar, elektrokimyasal olarak daha yüksek performansa sahip elektrotlar, zengin enerji içeriğine sahip organik malzeme vb. konularda araştırmalar yapılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamızın gerçekleşmesi için gerekli alet, cihaz, malzeme, donanım desteği sağladıkları için Koç Holding'e, Arçelik'e, TÜPRAŞ'a ve Fethi Gedik'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Mohamed, S. N., HIRAMAN, P. A., MUTHUKUMAR, K., JAYABALAN, T. (2020). Bioelectricity production from kitchen wastewater using microbial fuel cell with photosynthetic algal cathode. *Bioresource Technology*, 295, 122226, 1-7.
- [2] ÇEK, N. (2016). *Parçacıklar ve Enerji Kaynakları. 1. Baskı*, Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 338.
- [3] ÇEK, N. (2017). Examination of Zinc Electrode Performance in Microbial Fuel Cells. *Gazi University Journal of Science*, 30(4), 395-402.
- [4] Erensoy, A., ÇEK, N. (2018). Alternative Biofuel Materials for Microbial Fuel Cells from Poplar Wood. *ChemistrySelect*, 3, 1251-11257.
- [5] ÇEK, N., Erensoy, A. (2019). Kompost Mikrobiyal Yakıt Hücreleri İçin Titanyum Elektrot Performansının İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 909-915.
- [6] Pushkar, P., Mungray, A. K. (2020). Exploring the use of 3 dimensional low-cost sugar-urea carbon foam electrode in the benthic microbial fuel cell. *Renewable Energy*, 147(1), 2032-2042.
- [7] Taşkan, E. (2016). Sediment Tipi Mikrobiyal Yakıt Hücreleri Kullanılarak Arıtma Çamurlarından Elektrik Üretimi. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 28 (1), 15-21.
- [8] Taşkan, B., Taşkan, E., Hasar, H. (2020). Electricity generation potential of sewage sludge in sediment microbial fuel cell using Ti-TiO₂ electrode. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 1-8.
- [9] Wang, C., Jiang, H. (2019). Real-time monitoring of sediment bulking through a multi-anode sediment microbial fuel cell as reliable biosensor. *Science of The Total Environment*, 697, 134009, 1-8.
- [10] Fickett, F. R. (1982). *Electrical Properties of Materials and Their Measurement at Low Temperatures*. U.S. Government Printing Office, Washington, 76.
- [11] Sharma, I., Ghangrekar, M. M. (2018). Evaluating the suitability of tungsten, titanium and stainless steel wires as current collectors in microbial fuel cells. *Water Science & Technology*, 77 (4), 999-1006.
- [12] Sudirjo, E. (2020). Plant Microbial Fuel Cell in Paddy Field: a power source for rural area. Doctoral Thesis, Wageningen University, Graduate School for Socio-Economic and Natural Sciences of the Environmental, Wageningen.
- [13] Maslennikova, A. V. (2020). Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia. *Journal of Paleolimnology*, 63, 129-146.

- [14] Yusuf, Y. O., Iguisi E., O., Falade, A. M. (2012). Fluxes in Suspended Sediment Concentration and Total Dissolved Solids Upstream of the Galma Dam, Zaria, Nigeria. In book: Ecological Water Quality-Water Treatment and Reuse, IntechOpen, 439-454.
- [15] Rogowski, D. (2000). Saltwater Intrusion in Salmon Bay and Lake Union Sediments. Washington State Department of Ecology Report, Publication No. 00-03-032, p. 23.
- [16] Wakeham, S. G., Canuel, E. A. (2016). The nature of organic carbon in density-fractionated sediments in the Sacramento-San Joaquin River Delta (California). *Biogeosciences*, 13, 567-582.
- [17] Rajib, M., Parveen, M., Oguchi, C. T. (2019). A rapid technique for measuring oxidation-reduction potential for solid materials. *Journal of Science, Technology&Environment Informatics*, 7 (01), 510-516.
- [18] Vongvichiankul, C., Deebao, J., Khongnakorn, W. (2017). Relationship between pH, Oxidation Reduction Potential (ORP) and Biogas Production in Mesophilic Screw Anaerobic Digester. *Energy Procedia*, 138, 877-882.
- [19] Rusnak, J. M., Smith, L. A. (2014). Botulinum Neurotoxins from *Clostridium botulinum*. In book: Manual of Security Sensitive Microbes and Toxins, CRC Press, New York, 451-466.
- [20] Soyergin, S. (2003). *Organik Tarımda Toprak Verimliliğinin Korunması, Gübreler ve Organik Toprak İyileştiricileri*. Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü, Yalova, [http://www.selcuk.edu.tr/dosyalar/files/068/Org_%20Tar_%20Top_%20Veriml_%20Kor_ve%20Gübreler_%20Doç_%20Dr_Serap%20S\(2\).pdf](http://www.selcuk.edu.tr/dosyalar/files/068/Org_%20Tar_%20Top_%20Veriml_%20Kor_ve%20Gübreler_%20Doç_%20Dr_Serap%20S(2).pdf)
- [21] Alataş, Z., Güner, A. (2018). Clostridium difficile: Yeni Bir Gıda Patojeni mi? *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi*, 13 (3), 389-396.
- [22] Erensoy, A., Çek, N. (2020). Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Saf Kültür Mikroorganizmaları ve Genel Özellikleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 109-117.
- [23] Pareek, A., Sravan, J.S., Mohan, S.V. (2019). Exploring chemically reduced graphene oxide electrode for power generation in microbial fuel cell. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 600-606.
- [24] Chen, S., Patil, S. A., Brown, R. K., Schröder, U. (2019). Strategies for optimizing the power output of microbial fuel cells: Transitioning from fundamental studies to practical implementation. *Applied Energy*, 233-234, 15-28.
- [25] Jiang, M., Xu, T., Chen, S. (2020). A mechanical rechargeable small-size microbial fuel cell with long-term and stable power output. *Applied Energy*, 260, 114336, 1-7.
- [26] Çek, N. (2016). Parçacıklar ve Parçacıkların Enerji Kaynakları Üzerinde Etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 (7), 1-8.

Araştırma Makalesi-Research Article

Atangana-Baleanu Caputo Anlamında Üçüncü Mertebeden Kesirli Türevli Diferansiyel Denklemler için Implicit Rather Fark Metodu

Mahmut Modanlı^{1*}, Sümeyye Eker²

Geliş / Received: 17/04/2020

Revize / Revised: 07/09/2020

Kabul / Accepted: 30/09/2020

ÖZ

Atangana-Baleanu Caputo (ABC) türevi ile tanımlı üçüncü mertebeden kesirli kısmi diferansiyel denklemin tam çözümü başlangıç ve sınır değerlerine bağlı olarak hesaplandı. Bu denklem için kararlılık kestirimleri verildi. Bu denklem Implicit Rather fark metodu ile çözüldü. Problem için fark şemalarının kararlılığı gösterildi. Bu teknik ABC üçüncü mertebeden kısmi diferansiyel denklemin $\alpha = 0.001, 0.1, 0.5, 0.99, 0.999$ için kesirli türev değerlerine karşılık uygulanmıştır. Yaklaşık çözüm, tekniğin doğruluğunu ve etkinliğini onaylar.

Anahtar Kelimeler- Kesirli Diferansiyel Denklemi, Implicit Rather Fark Şeması, Kararlılık Kestirimi, Yaklaşık Çözüm, Tam Çözüm

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: mmodanli@harran.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7743-3512>)

Matematik Bölümü, Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Osmanbey Kampüsü, 63100, Şanlıurfa

²İletişim: sumeyyeeker34@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7278-4711>)

Matematik Bölümü, Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Osmanbey Kampüsü, 63100, Şanlıurfa

Implicit Rather Difference Method for Third Order Differential Equations in the Sense of Atangana-Baleanu Caputo Fractional Derivative

ABSTRACT

The exact solution of the third order partial differential equation defined by Atangana-Baleanu Caputo (ABC) fractional derivative is calculated for depending on the initial and boundary values. Stability estimates are obtained for this equation. Implicit Rather difference schemes are constructed for this problem. The stability of difference schemes for this problem is presented. This technique has been applied by ABC fractional orders $\alpha = 0.001, 0.1, 0.5, 0.99, 0.999$. Approximation solution confirms the accuracy and effectiveness of the technique.

Keywords- *Fractional Differential Equation, Implicit Rather Difference Schemes, Stability Estimates, Approximation Solution, Exact Solution.*

I. INTRODUCTION

Fractional differential equations have several implementations in finance, engineering, physics, and seismology [1-3]. It is developed because of its applications in different areas of geophysics, biology, chemical and petroleum industries [4]. Michele Caputo and Mauro Fabrizio presented a fractional derivative operator based on the exponential function to overcome the problem of the singular kernel in 2015 [5]. But their fractional derivative operator does not have singular kernel [6, 7]. Atangana and Alqahtani applied the concept of Caputo Fabrizio (CF) fractional derivatives to the equation of ground water pollution [8]. CF fractional derivative, as the kernel in integral was non-singular but was still non-local. To eliminate singularity and non-locality, Atangana and Baleanu identified a new derivative with the help of Mittag-Leffler function [9, 10]. However, Atangana et al. provided the numerical approximation to the fractional Advection-Diffusion equation whose fractional derivatives are Atangana- Baleanu derivative of Riemann- Liouville type [11]. In many similar current life problems, the ABC derivative has been used. Modanli has studied two different numerical methods for the fractional telegraph differential equation [12]. The Atangana- Baleanu derivative has been applied in modeling of many real problems [13, 14].

In this paper, the implicit rather difference method is used for the third order partial differential equation defined by ABC fractional derivative. The stability estimates are shown by the Von-Neuman's method.

Now, we examine the following fractional differential equation defined by ABC derivative

$$\begin{cases} \frac{\partial^3 u(t,x)}{\partial t^3} + m \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial t^2} + {}^{ABC}D_t^\alpha u(t,x) - n \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial x^2} - p \frac{\partial u(t,x)}{\partial x} + u(t,x) = f(t,x) \\ 0 < x < L, \quad 0 < t < T, \quad 0 < \alpha \leq 1, \\ u(0,x) = h_1(x), \quad u_t(0,x) = h_2(x), \quad u_{tt}(0,x) = h_3(x), \quad 0 \leq t \leq T, \\ u(t, X_L) = r_1(t), \quad u(t, X_R) = r_2(t), \quad X_L < x < X_R, \\ m > 0, \quad n > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Here, h_1, h_2, h_3, r_1, r_2 and f are known functions, $u(t,x)$ is unknown function. For $\alpha = 1$, the problem (1) was called as the third order linear time-varying systems model [13]. For more details see [15-22].

Now, we present some basic definitions and properties of fractional calculus theory for third order differential equation defined by fractional ABC derivative.

Definition 1: Let $f \in H^1(a,b), b > a, \alpha \in [0,1]$, then the definition of the new fractional derivative (Atangana-Baleanu derivative in Caputo sense) is given as [13]:

$${}^{ABC}D_t^\alpha u(t) = \frac{B(\alpha)}{1-\alpha} \int_0^t f'(x) E_\alpha \left[-\alpha \frac{(t-x)^\alpha}{1-\alpha} \right] dx. \quad (2)$$

Where $B(\alpha) = 1 - \alpha + \frac{\alpha}{\Gamma(\alpha)}$ and E_α is the Mittag-Leffler function. We defined this function as following:

$$E_\alpha \left[-\alpha \frac{(t-x)^\alpha}{1-\alpha} \right] = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{-\alpha \frac{(t-x)^\alpha}{(1-\alpha)}^k}{\Gamma(\alpha k + 1)}.$$

Definition 2: Atangana- Baleanu obtained the Laplace transform for the Eq. 1 as [13]:

$$\mathcal{L}\{ {}^{ABC}D_t^\alpha (u(t)) \} = \frac{B(\alpha) u(s) s^\alpha - s^{\alpha-1} u(0)}{s^\alpha + \frac{\alpha}{1-\alpha}}. \quad (3)$$

Next section, we shall calculate the exact solution by the Laplace transform method of the third order partial differential equation defined by ABC fractional derivative operator.

II. EXACT SOLUTION OF THE THIRD ORDER DIFFERENTIAL EQUATION IN SENSE OF ABC FRACTIONAL DERIVATIVE

In this section, we shall find the exact solution of the problem (1) by Laplace transform method. From the problem (1), taking $p = 0$, we have the following problem

$$\begin{cases} \frac{\partial^3 u(t,x)}{\partial t^3} + m \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial t^2} + {}^{ABC}D_t^\alpha u(t,x) - n \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial x^2} + u(t,x) = f(t,x), \\ 0 < x < L, \quad 0 < t < T, \quad 0 < \alpha \leq 1, \\ u(0,x) = h_1(x), \quad u_t(0,x) = h_2(x), \quad u_{ttt}(0,x) = h_3(x), \quad X_L \leq x \leq X_R, \\ u(t, X_L) = r_1(t), \quad u(t, X_R) = r_2(t), \quad 0 \leq t \leq T, \\ m > 0, \quad n > 0. \end{cases} \quad (4)$$

The problem (4) was studied in the [14]. In this study, we shall the problem (1). Using the operator method, the exact solution of the problem (1) can be found similar as [14]. For the exact solution of the problem (1), we give one test example problem.

Example 1: We consider the following problem for the special values $m = n = p = 1$

$$\begin{cases} \frac{\partial^3 u(t,x)}{\partial t^3} + m \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial t^2} + {}^{ABC}D_t^\alpha u(t,x) - n \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial x^2} + u(t,x) = f(t,x), \\ f(t,x) = \left(\frac{6(1-\alpha)}{\beta(\alpha)} + \frac{6t^\alpha}{\beta(\alpha)\Gamma(\alpha)} + \frac{6t(1-\alpha)}{\beta(\alpha)} + \frac{6t^{\alpha+1}}{(\alpha+1)\Gamma(\alpha)} + t^3 \right. \\ \left. + \frac{1-\alpha}{\beta(\alpha)} t^3 + \frac{6\alpha}{\Gamma(\alpha+4)\beta(\alpha)} t^{\alpha+3} \right) (x-x^2) + 2 \left(\frac{1-\alpha}{\beta(\alpha)} t^3 + \frac{6\alpha}{\Gamma(\alpha+4)\beta(\alpha)} \right) \\ \left. + \left(\frac{1-\alpha}{\beta(\alpha)} t^3 + \frac{6\alpha}{\Gamma(\alpha+4)\beta(\alpha)} t^{\alpha+3} \right) (1-2x), \right. \\ u(0,x) = u_t(0,x) = u_{ttt}(0,x) = 0, \quad 0 \leq x \leq 1, \\ \left. u(t,0) = u(t,1) = 0, \quad 0 \leq t \leq 1. \right. \end{cases} \quad (5)$$

Eq. (2) using the initial conditions in the Eq. (5) and taking the Laplace transform to both of the Eq. (5), we obtain

$$\begin{aligned} & (s^3 + s^2 \frac{\beta(\alpha)}{1-\alpha} \frac{s^\alpha}{s^\alpha + \frac{\alpha}{1-\alpha}}) - \frac{\partial^2 u(s,x)}{\partial x^2} - \frac{\partial u(s,x)}{\partial x} \\ & = \frac{6}{\beta(\alpha)} \left(\frac{6(1-\alpha)}{s^4} + \frac{\alpha+1}{s^{\alpha+1}} + \frac{1-\alpha}{s^2} + \frac{\alpha+1}{s^{\alpha+2}} + \frac{\beta(\alpha)}{s^4} + \frac{1-\alpha}{s^4} + \frac{\alpha}{s^{\alpha+4}} \right) (x-x^2) \\ & \quad + \frac{6}{\beta(\alpha)} \left[\frac{2(1-\alpha)}{s^4} + \frac{2\alpha}{s^{\alpha+4}} + \left(\frac{(1-\alpha)}{s^4} + \frac{\alpha}{s^{\alpha+4}} \right) (1-2x) \right]. \end{aligned}$$

Solving this equation for homogenous and non-homogenous part as to x , using boundary value conditions, we have

$$u(s,x) = \frac{6}{s^4} \left(\frac{1-\alpha}{\beta(\alpha)} + \frac{\alpha}{s^\alpha \beta(\alpha)} \right) (x-x^2). \quad (6)$$

Taking the inverse Laplace transform for the Eq. (6) we get the exact solution of this example following as:

$$u(t,x) = \left(\frac{1-\alpha}{\beta(\alpha)} t^3 + \frac{6\alpha}{\Gamma(\alpha+4)\beta(\alpha)} t^{\alpha+3} \right) (x-x^2).$$

Next section, we shall construct difference scheme for the implicit rather difference scheme method. Then we prove the stability estimates for this difference scheme method.

III. STABILITY ESTIMATES FOR THE IMPLICIT RATHER DIFFERENCE SCHEME METHOD

Now, we will obtain difference schemes of implicit rather difference method for the partial differential equation 1. Let's assume that $h = \frac{x_R - x_L}{M}$ for x - axis, $\tau = \frac{T}{N}$ for t - axis and then we can write

$$x_n = x_L + nh; n = 1, 2, \dots, M, t_k = k\tau, k = 1, 2, \dots, N.$$

We construct implicit rather difference method for third order partial differential equation defined by ABC derivative of the formula (1). Using Taylor series formula, we obtain the following formulas:

$$\frac{\partial^3 u(t_k, x_n)}{\partial t^3} \cong \frac{u_n^{k+2} - 3u_n^{k+1} + 3u_n^k - u_n^{k-1}}{\tau^3}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 u(t_k, x_n)}{\partial t^2} \cong \frac{u_n^{k+1} - 2u_n^k + u_n^{k-1}}{\tau^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 u(t_k, x_n)}{\partial x^2} \cong \frac{u_{n+1}^k - 2u_n^k + u_{n-1}^k}{h^2}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u(t_k, x_n)}{\partial x} \cong \frac{u_{n+1}^k - u_n^k}{h}, \quad (10)$$

and difference scheme for ${}^{ABC}_0 D_t^\alpha u(t_k, x_n)$ fractional derivative was obtained in [8] as:

$${}^{ABC}_0 D_t^\alpha u(t_k, x_n) \cong \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \sum_{j=0}^k \frac{u_{n+1}^j - u_n^j}{h} d_{j,k}, \quad (11)$$

where $d_{j,k} = (t_j - t_{k+1})^{1-\alpha}$.

Using the formulas (7-11), we obtain the implicit rather difference method for third order partial differential equation defined by ABC derivative of the formula (1) as:

$$\begin{cases} \frac{u_n^{k+2} - 3u_n^{k+1} + 3u_n^k - u_n^{k-1}}{\tau^3} + m \frac{u_n^{k+1} - 2u_n^k + u_n^{k-1}}{\tau^2} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \sum_{j=0}^k \frac{u_{n+1}^j - u_n^j}{h} d_{j,k} \\ - n \frac{u_{n+1}^k - 2u_n^k + u_{n-1}^k}{h^2} - p \frac{u_{n+1}^k - u_n^k}{h} + u_n^k = f_n^k = f(t_k, x_n), \\ u_n^0 = h_1(x_n), \quad \frac{u_n^1 - u_n^0}{\tau} = h_2(x_n), \quad \frac{u_n^2 - 2u_n^1 + u_n^0}{\tau^2} = h_3, \quad 0 \leq n \leq M, \\ u_0^k = u_M^k = 0, \quad 0 \leq k \leq N, \\ m > 0, \quad n > 0. \end{cases} \quad (12)$$

Using the general Von-Neumann's method as the formula $n_n^k = r^k e^{in\theta}$ for stability estimates of the formula (12), we obtain

$$\begin{cases} r^3 + \left(-3 + m\tau + \frac{\tau^2(2\tau)^{1-\alpha}}{\Gamma(\alpha)}\right)r^2 + \left(3 - 2m\tau - \frac{\tau^2(-2\tau)^{1-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{2n\tau^3}{h^2} \cos\theta - \frac{2\lambda\tau^3}{h^2} - \frac{p\tau^3 e^{i\theta}}{h} + 1\right)r \\ -1 + k\tau + \frac{p\tau^3}{h} - f_0^1 = 0 \\ f_0^1 = f(\tau, 0), \quad \text{for } n = 0, \quad k = 1. \end{cases} \quad (13)$$

Taking $f_0^1 \rightarrow 0$, we can rewrite the formula (13) the following polynomial function form

$$\begin{cases} P(r) = r^3 + \left(-3 + m\tau + \frac{\tau^2(2\tau)^{1-\alpha}}{\Gamma(\alpha)}\right)r^2 + \left(3 - 2m\tau - \frac{\tau^2(-2\tau)^{1-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{2n\tau^3}{h^2} \cos\theta \right. \\ \left. - \frac{2\lambda\tau^3}{h^2} - \frac{p\tau^3 e^{i\theta}}{h} + 1\right)r - 1 + k\tau + \frac{p\tau^3}{h} = 0, \end{cases} \quad (14)$$

where

$$a_0 = -1 + k\tau + \frac{p\tau^3}{h},$$

$$a_1 = 3 - 2m\tau - \frac{\tau^2(-2\tau)^{1-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{2n\tau^3}{h^2} \cos\theta - \frac{2\lambda\tau^3}{h^2} - \frac{p\tau^3 e^{i\theta}}{h} + 1,$$

$$a_2 = -3 + m\tau + \frac{\tau^2(2\tau)^{1-\alpha}}{\Gamma(\alpha)},$$

$$a_3 = 1.$$

From the article [14], we write the following lemma.

Lemma 3: Taking $p = \frac{3a_1 - a_2^2}{9}$ and $q = \frac{9a_1 a_2 - 27a_0 - 2a_2^2}{54}$, then this formula have that the following roots

$$r_1 = \sqrt[3]{q + \sqrt{p^3 + q^2}},$$

$$r_2 = \sqrt[3]{q - \sqrt{p^3 + q^2}},$$

$$r_3 = -r_1 - r_2 - a_2.$$

When the found values a_0, a_1 and a_2 are written instead in this lemma, we obtained $r_1 < 1$, $r_2 < 1$ and $r_3 < 1$. r_1 and r_2 are stable but r_3 is unstable.

Next section, we shall show one example by the implicit rather difference method for the approximation solution.

IV. NUMERICAL IMPLEMENTATION

In section 2, we obtained the exact solution for one test problem. In this section, we shall investigate the approximation of this example by the implicit rather difference method. We utilize a procedure of modified Gauss elimination method for difference equation (12). We obtain the maximum norm of the error of the numerical solution by:

$$\varepsilon = \max \|u(t, x) - u(t_k, x_n)\|, n = 0, 1, \dots, M, k = 0, 1, 2, \dots, N$$

where $u_n^k = u(t_k, x_n)$ is the approximate solution and $u(t, x)$ is exact solution. The error analysis for this method.

Table 1. Error Analysis

α	$\tau = \frac{1}{N}, h = \frac{1}{M}$					
	The difference scheme (12)					
	0.1	0.50	0.01	0.99	0.999	1
$N = M = 20$	0.2155	0.1860	0.2008	0.0403	0.0380	0.0378
$N = M = 80$	1.8796	1.0237	1.6434	0.0680	0.0462	0.0418
$N = 400, M = 20$	0.1493	0.1277	0.1381	0.0230	0.0216	0.0214

From the error analysis table, obtained results are satisfied stability estimates for $N = M = 20$ and $N = 400, M = 20$ and all α . But it is not satisfied for $N = M = 80, 0.01 < \alpha < 0.5$. This result is due to the stability of the roots in lemma.

V. RESULTS

In this study, exact solution is obtained for by Laplace transform method for third order partial differential equation with ABC fractional derivative. First order difference schemes are presented. Stability inequalities are given for first order difference. We have utilized the implicit rather difference method to get algorithms for investigating third order partial differential equation with ABC fractional derivative. Approximate solutions are obtained by this method. MATLAB software program has been utilized for all results. Finally, the exact and the approximation solutions are compared. Obtained results showed that this approximation method is effective and good.

KAYNAKLAR

- [1] Celik, C. (2012). Crank-Nicholson Method for fractional Equation with the Riez's Fractional Derivative, *Journal of Computational Physics*, 231: 1743- 1750.
- [2] Gorial, I. I. (2011). Numerical methods for fractional reaction- dispersion equation with Riesz space fractional derivative, *Engineering and Technology. Journal*, 29, 709-715.
- [3] Jafari, H. W., Gejji, V. D. (2006). Solving Linear and Nonlinear Fractional Diffusion and Wave Equations by Adomian Decomposition, *Applied Mathematics and Computation*, 180, 488-497.
- [4] Bagley, R. (1983). A Theoretical Basis for the Application of Fractional Derivative Viscoelasticity, *Journal of Rheology*, 27, 201.
- [5] Caputo, M., Fabrizio, M. (2015). A New Definition of Fractional Derivative with out Singular Kernel, *Prog. Fract Differ*, 1(2), 1- 13.
- [6] Atangana, A. On the New Fractional Derivative and Application to Nonlinear Fisher's Reaction- Diffusion Equation, *Applied Mathematics Computation*, 273, 948-956.
- [7] Atangana, A., Nietto, J. J. (2015). Numerical Solution for of the RLC Circuit Via the Fractional Derivative without Singular Kernel, *Advances Mechanical Engineering*, 7(10), DOI: 10.1177/1687814015613758.
- [8] Alqahtani, R. T. (2016). Atangana-Baleanu derivative with fractional order applied to the model of groundwater within an unconfined aquifer, *J. Nonlinear Sci. Appl*, 9(6), 3647-3654.
- [9] Atangana, A., Baleanu, D. (2016). New Fractional Derivatives with Nonlocal and Nonsingular Kernel Theory and Application to Heat Transfer Model, *Arxiv preprint, Arxiv*: 1602.03408.
- [10] Atangana, A., Baleanu, D. (2016). Caputo- Fabrizio Derivative Applied to Groundwater Flow within Confined Aquifer, *Journal of Nonlinear Science and Applications*, 9, 3647- 3654.

- [11] Atangana, A., Gomez- Aguilar, J. F. (2018). A Mathematical Analysis of a Circular Pipe in Rate Type Fluid Via Hankel Transform, *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 34 (5), 1502- 1523.
- [12] Modanli, M. (2018).Two Numerical Methods for Fractional Partial Differential Equation with Nonlocal Boundary, *Advances in Difference Equations*, 19 (1), 333.
- [13] Atangana, A., Koca, I. (2016). Chaos in a Simple Nonlinear System with Atangana- Baleanu Derivatives with Fractional Order, *Chaos, Solitons and Fractals*, 89, 447- 454.
- [14] Akgül, A.,Modanli, M. (2019). Crank- Nicholson Difference Scheme Method and Reproducing Kernel Function for Third Order Differential Equations in the Sense of Atangana-Baleanu Caputo Derivative, *Chaos, Solitons and Fractals*, 127, 10-16.
- [15] Qureshi, S.,Atangana, A. (2019). Mathematical Analysis of Dengue Fever Outbreak by Novel Fractional Operators with Field Data, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, DOI: 10.1016/j.physa.2019.121127.
- [16] Abro, K. A., Khan, I., Gomez- Aguilar, J. F. (2018). A Mathematical Analysis of a Circular Pipe in Rate Fluid via Hankel Transform, *The European Physical Journal Plus*, 133 (10), 397.
- [17] Gomez- Aguilar, J. F., Abro, K. A., Kolebaje, O., Yıldırım, A. (2019). Chaos in a Calcium Oscillation Model via Atangana- Baleanu Operator with Strong Memory, *The European Physical Journal Plus*, 134 (4), 140.
- [18] Yusuf, A., Qureshi, S., Inc, M., Aliyu A. I., Baleanu, D., Shaikh A. A. (2018).Two Strain Epidemic Model Involving Fractional Derivative with Mittag- Leffler Kernel, *Chaos*, 28 (12), 123121.
- [19] Qureshi, S., Yusuf, A. (2019). Fractional Derivatives Applied to MSEIR problems: Comparative Study with Real Word Data, *The European Physical Journal Plus*, 134 (4), 171.
- [20] Qureshi, S., Yusuf, A. (2019). Modeling Chickenpox Disease with Fractional Derivatives: From Caputo Atangana- Baleanu, *Chaos, Solitons and Fractals*, 122, 111- 118.
- [21] Durur, H., Yokuş, A. (2020). Analytical solutions of Kolmogorov–Petrovskii–Piskunov equation, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 628-636.
- [22] Modanli, M. (2019). On the numerical solution for third order fractional partial differential equation by difference scheme method. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 9(3), 1-5.

Araştırma Makalesi - Research Article

Kobalt Katkılı Kalsiyum Manganez Oksit Numunelerin Sentez ve Karakterizasyonu

Tankut Ateş^{1*}, Süleyman Köytepe², Ömer Kaygılı³

Geliş / Received: 17/04/2020

Revize / Revised: 11/08/2020

Kabul / Accepted: 22/08/2020

ÖZ

Bu çalışmada, kobalt katkı kalsiyum manganez oksit numunelerinin faz bileşimleri, kristal yapıları, yüzey morfolojileri ve termal özellikleri karakterize edildi. Co miktarının bu oksit yapı üzerindeki etkileri belirlendi. X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları, kalsiyum manganez oksit fazlarının oluşumuna işaret etmektedir. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) analizleri, her bir numune için peroksit yapısının oluşumunu doğrulamaktadır. Termal analiz sonuçları, üretilen numunelerin termal olarak kararlı olduklarını göstermektedir. Numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) gözlemleri ve enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizleri, Co katkısının morfolojiye etki ettiğini ve kalsiyum manganez oksit yapıya nüfuz ettiğini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler- *Kalsiyum Manganez Oksit, X-Işını Kırınımı (XRD), Morfoloji, Co Katkılama*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: tankut.ates@ozal.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4519-2953>)

Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Turgut Özal Üniversitesi, 44210 Malatya

²İletişim: suleyman.koytepe@inonu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4788-278X>)

Kimya Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, İnönü Üniversitesi, 44280 Malatya

³İletişim: omerkaygili@yahoo.com (<https://orcid.org/0000-0002-2321-1455>)

Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 23119 Elazığ

Synthesis and Characterization of Cobalt-Doped Calcium Manganese Oxide Samples

ABSTRACT

In this study, the phase compositions, crystal structures, surface morphologies, and thermal properties of cobalt-doped calcium manganese oxide samples were characterized. The effects the amount of Co on this oxide structure were determined. X-ray diffraction (XRD) analysis results indicate the formation of the calcium manganese oxide phases. Fourier transform infrared (FTIR) analyses verify the formation of the perovskite structure for each sample. Thermal analysis results show that the as-produced samples are thermally stable. The scanning electron microscope (SEM) observations and energy dispersive X-ray (EDX) analyses support that the Co-doping affects the morphology and influences the calcium manganese oxide structure.

Keywords- *Calcium Manganese Oxide, X-Ray Diffraction (XRD), Morphology, Co-Doping*

I.GİRİŞ

Peroksit minerali ilk olarak Rusya'da Ural dağlarının eteklerinde CaTiO_3 (kalsiyum titanyum oksit) minerali şeklinde tespit edildikten sonra, zamanla bu isim, benzer kristal yapıdaki daha geniş malzeme grubu olarak genelleştirilmiştir. Peroksit için ABC_3 formülasyonu kullanılmaktadır. Peroksit malzemelerin ideal kristal yapısı, kübik simetriye uygundur [1,2].

A ve B kanyonları farklı grupları temsil etmek üzere, C anyonu olarak oksijen kullanılmasıyla ABO_3 peroksit oksit yapısı karşımıza çıkar. ABO_3 peroksit oksit yapıda genellikle, A kasyonu nadir toprak elementlerinden (La, Pr vb.), alkali veya toprak alkali metallere (Ca, Sr, Ba vb.), B kanyonları ise geçiş metallere (Mn, Co vb.) seçilebilir [1-4].

Peroksit oksitlerden, Kalsiyum Manganez Oksitlerin(CaMnO_3) yapısı, köşe paylaşımlı oktahedron şeklindedir. Oktahedronun merkezinde daha küçük iyon yarıçaplı Mn kasyonu köşelerdeki 6 oksijen anyonları ile çevrilidir. Daha büyük iyon yarıçaplı Ca iyonu ise 12 oksijen anyonu ile çevrilidir [1-4]. Bu kristal yapı malzemeye, fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilme imkânı sunan, değişik değerlik ve boyutlarda çok farklı katkılama kabiliyeti sunar [5,6]. Katkı maddesi, yarıçapına bağlı olarak A bölgesini, B bölgesini ya da A ve B bölgelerinin ikisini de işgal edecektir. Tipik olarak, daha büyük katkı atomları A bölgelerini işgal ederken, daha küçük kanyonlar B bölgelerini tercih eder [7].

Manganez oksit peroksitlerin, çok iyi manyetorezistans özelliği, iletkenlik, manyetik, elektronik ve termoelektrik özelliklerinden dolayı, mikroelektronik uygulamalarda, orta derece manyetik alanlar için Hall problemleri ve manyetik disklerdeki okuma kafaları, manyetorezistans dönüştürücü ve sensörler (manyetik alan sensörleri) gibi uygulama alanları vardır [3,8,9]. Ayrıca CaMnO_3 peroksitler, iyi elektriksel ve manyetik özelliklerinden dolayı, kimyasal uygulamalar arasında, katı oksit yakıt hücre elektrotları, otomobil egzoz katalizörleri için düşünülmüştür [3,9,10].

Son yıllarda peroksit malzemelerin fotovoltaik özelliklerinden dolayı, günümüz güneş enerji teknolojilerine göre %20 daha fazla verim sağlayan bu malzemeler ilgi uyandırmıştır. Fotovoltaik cihazlarda emici katman olarak peroksit malzemelerin kullanımı, yüksek emilim katsayısı, uzun difüzyon uzunluğu, 1,4-3,0 eV arası ayarlanabilir bant boşluğu gibi fizikokimyasal özelliklerinden dolayı avantajlıdır [11].

Artan enerji krizi, fosil yakıt kullanımını azaltmak ve çevresel olumsuz etkileri azaltmak için yeni enerji çözümlerine ihtiyaç vardır [12]. Özellikle endüstriyel alanlardaki atık ısı enerjisi ve otomobillerin motorlarındaki kayıp ısı enerjisi, jeotermal ısı, güneş ısı gibi enerji kayıplarını ortadan kaldırıp yenilenebilir şekilde dönüştürmek ve ayrıca çevreye zararlı sera gazını azaltmak için umut verici bir yöntem termoelektrik (TE) cihazlardır [12-14]. TE cihazları kayıp durumundaki bu atık ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir [14-17]. N-tipi oksit yarıiletken CaMnO_3 malzemelerin, geleneksel TE malzemelerinin sahip olduğu yüksek Seebeck katsayısı, düşük elektriksel direnç ve toplam termal iletkenlik özelliklerine [5,13,15,18-20] sahip olmasının yanında, çevreye duyarlı (toksik değil), yüksek termal kararlılık, hammaddelerin ucuzluğu ve kolay imalatı gibi olağanüstü avantajlara sahip olması TE malzemeler olarak kullanımını desteklemektedir [5,12-16,21].

Bu avantajlarının yanında CaMnO_3 malzemeler tüm oksit malzemelerdeki düşük enerji dönüşüm verimliliğine sahiptir [12,16]. Ayrıca düşük mekanik mukavemet, 900 °C civarında meydana gelen faz modifikasyonları olasılığı, oksijen açısından zengin alanların ortaya çıkması diğer olumsuzlukları olarak sıralanabilir [12].

Literatürde yapılan çalışmalar katkılama işleminin çalışılan malzemenin elektronik, yapısal ve optik özelliklerini geliştirerek, istenilen özellikte bir malzeme elde etmemize yardımcı olmaktadır [22,23]. Örneğin, CaMnO_3 üzerine yapılan çalışmalarda, Zhang ve diğerleri [5], Sr katkısının CaMnO_3 sisteminin TE özelliklerini geliştirebileceğini rapor etmişlerdir. Zhan ve diğerleri [24], Dy katkısının CaMnO_3 yapısına eklenmesi ile elektriksel iletkenliğin geliştirilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Liu ve diğerleri [14] çalışmalarında nadir toprak elementi Pr ve alkali toprak elementi Sr katkılama yapısındaki gözenekliliği azalttığı, elektriksel iletkenliği artırdığı, birlikte katkılama ile toplam termal iletkenliğin daha da düşürülebileceğini ve birlikte katkılama işleminin malzemenin TE performansını iyileştirmede alternatif olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Ayrıca, Park ve diğerleri [25] yaptıkları çalışmada CaMnO_3 yapısına sırası ile Bi ve Nb'nin Ca bölgesine ve Mn bölgesine eşzamanlı olarak katkılanması ile elektriksel iletkenliğin artırıldığı ve TE özelliklerinin geliştirildiğinin gözlemlendiğini, bunlara ek olarak artan sıcaklıkla Seebeck katsayısının artma ve elektriksel iletkenliğin düşme eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir.

II.MATERYAL VE YÖNTEM

Numunelerin sentezi esnasında Sigma-Aldrich firmasından satın alınan kalsiyum nitrat tetrahidrat, mangan nitrat tetrahidrat ve kobalt nitrat tetrahidrat kullanılmıştır. Numunelerin sentezi şu şekilde gerçekleştirilmiştir: 100 mL'lik 20 mmol kalsiyum nitrat tetrahidrat çözeltisi (saf suda), yine 100 mL'lik (20-x) mmol mangan nitrat tetrahidrat ve x mmol kobalt nitrat tetrahidrat çözeltisi (saf suda) içerisinde dökülerek yeni bir çözelti elde edilmiştir. Burada x değeri 0, 2, 4 ve 6 alınmak suretiyle dört farklı numune üretilmiş olup, üretilen bu numuneler de sırasıyla CMO1, CMO2, CMO3 ve CMO4 şeklinde isimlendirilmiştir. Sonrasında elde edilen son çözelti, ısıtıcı bir manyetik karıştırıcı yardımıyla 75 °C sıcaklıkta 2,5 saat karıştırıldı, 130 °C sıcaklıkta 24 saat kurutuldu ve sonrasında kül fırını içerisinde 1050 °C'de 1,5 saat ısıl işleme tabi tutularak kobalt katkılı kalsiyum mangan oksitler üretilmiştir.

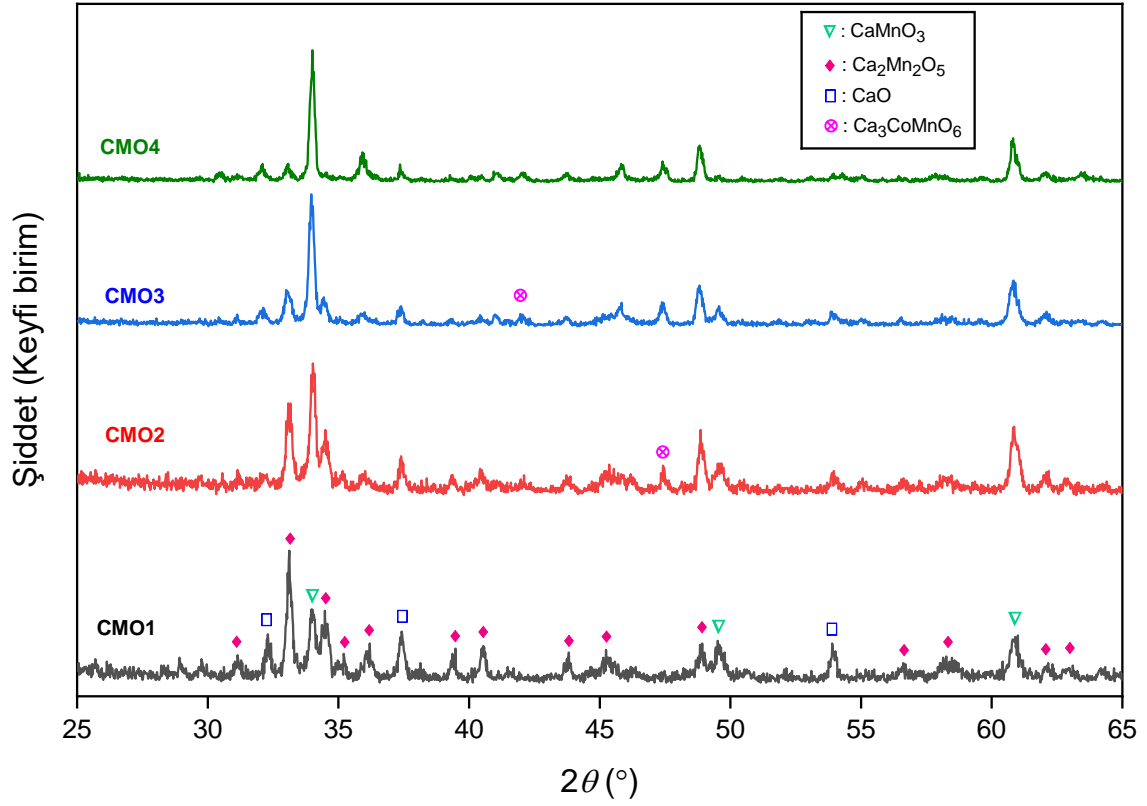
X-ışını kırınımı (XRD) analizleri Bruker D8 Advance cihazıyla ve Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumları Perkin Elmer Spectrum two spektrofotometresiyle 400 – 4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında kaydedildi. Morfolojik gözlemler Röntech xflash model enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizörüne sahip LEO EVO 40xVP model taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirildi.

Çalışma kapsamında sentezlenen kobalt katkılı kalsiyum mangan oksit numunelerinin termal özellikleri Shimadzu TGA-50 ve Shimadzu DTA-50 cihazları ile belirlendi. DTA analizleri 10 °C/dk. ısıtma hızında ve 50 mL/dk. akış hızındaki dinamik azot atmosfer altında gerçekleştirildi. Bu analizlerde $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ referans malzemesi olarak kullanılmıştır. TGA analizleri ise 30 °C – 1000 °C aralığında 10 °C / dk.'lık bir ısıtma hızı ile belirlendi. TGA analizleri 10 mg numune kullanılarak 50 mL/dk. akış hızındaki dinamik azot atmosfer altında gerçekleştirilmiştir.

III.BULGULAR VE TARTIŞMA

A. X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi

Katkısız ve Co-katkılı kalsiyum mangan oksit numunelere ait X-ışını kırınımı (XRD) desenleri Şekil 1'de verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi Co katkısı ve bunun miktarıyla pik şiddetlerinde belirgin değişimler meydana gelmektedir. Şekil 1'de verilen XRD desenlerinde $\text{Ca}_2\text{Mn}_2\text{O}_5$ (JCPDS PDF no: 36-0531, ortorombik), CaMnO_3 (JCPDS PDF no: 76-1132), CaO (JCPDS PDF no: 37-1497, kübik) ve $\text{Ca}_3\text{CoMnO}_6$ (JCPDS PDF no: 51-1776, trigonal) fazlarına ait pikler görülmektedir. Tüm numuneler için gözlemlenen bu piklerin yüzde bileşimleri Tablo 1'de verildiği gibidir. Co katkısı ile $\text{Ca}_3\text{CoMnO}_6$ fazının oluşumu gözlenmektedir. Co katkısı arttıkça CaO fazının giderek gözden kaybolmaya başladığı görülmektedir. Yine artan Co miktarıyla CaMnO_3 fazının baskınlığının arttığı görülmektedir. Ayrıca, pik şiddetlerindeki değişim ve gözlemlenen faz dönüşümleri, Co'ın yapı içerisine nüfuz ettiğinin bir göstergesidir.



Şekil 1. CMO1, CMO2, CMO3 ve CMO4 numunelerine ait XRD desenleri

Kristal büyüklüklerinin (D) hesaplanması Scherrer denklemi kullanılarak gerçekleştirildi [26].

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

Burada λ dalga boyu, β yarı maksimumdaki tam pik genişliği ve θ Bragg açısıdır. Numunelerin kristal büyüklükleri CMO1, CMO2, CMO3 ve CMO4 için sırasıyla 40,06 nm, 31,85 nm, 34,34 nm ve 39,21 nm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, Co katkısının kristal büyüklüğü üzerine etki ettiğini destekler niteliktedir.

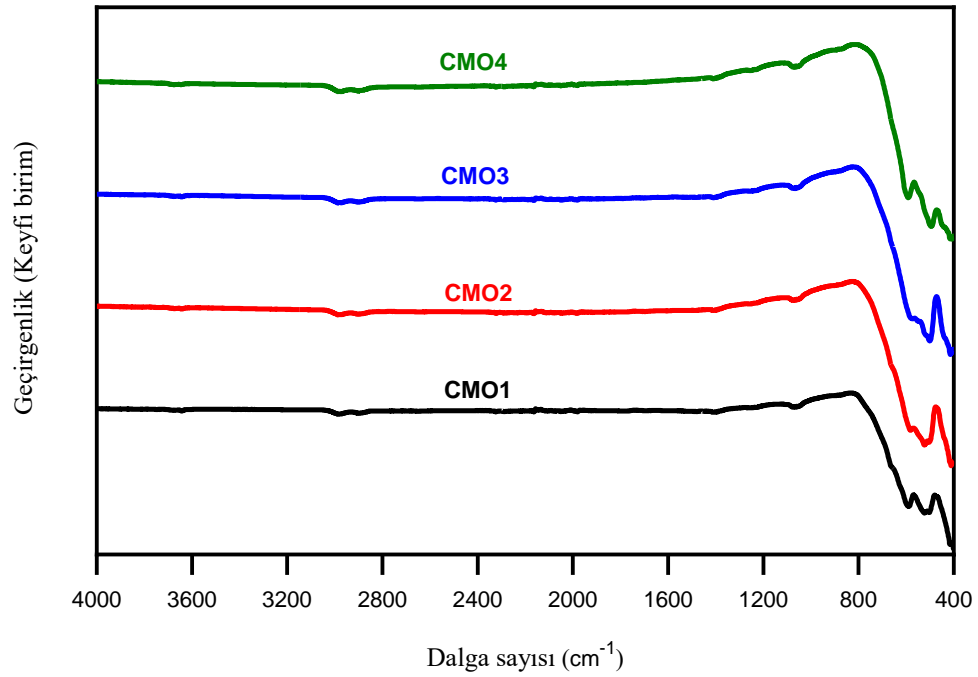
Tablo 1. Kalsiyum mangan oksit numunelerine ait faz bileşimleri

Numune	Ca ₂ Mn ₂ O ₅ (%)	CaMnO ₃ (%)	CaO (%)	Ca ₃ CoMnO ₆ (%)
CMO1	79,81	11,29	8,90	-
CMO2	71,34	18,11	8,37	2,18
CMO3	54,28	31,70	6,79	7,23
CMO4	25,03	60,31	1,55	13,11

B. FTIR Analiz Sonuçları

Sentezlenen farklı oranlarda kobalt katkılı kalsiyum mangan oksit numunelerinin FTIR spektrumları Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu analizlerde iki farklı spektrum yapısı görülmektedir. CMO1 yapısının analizinde

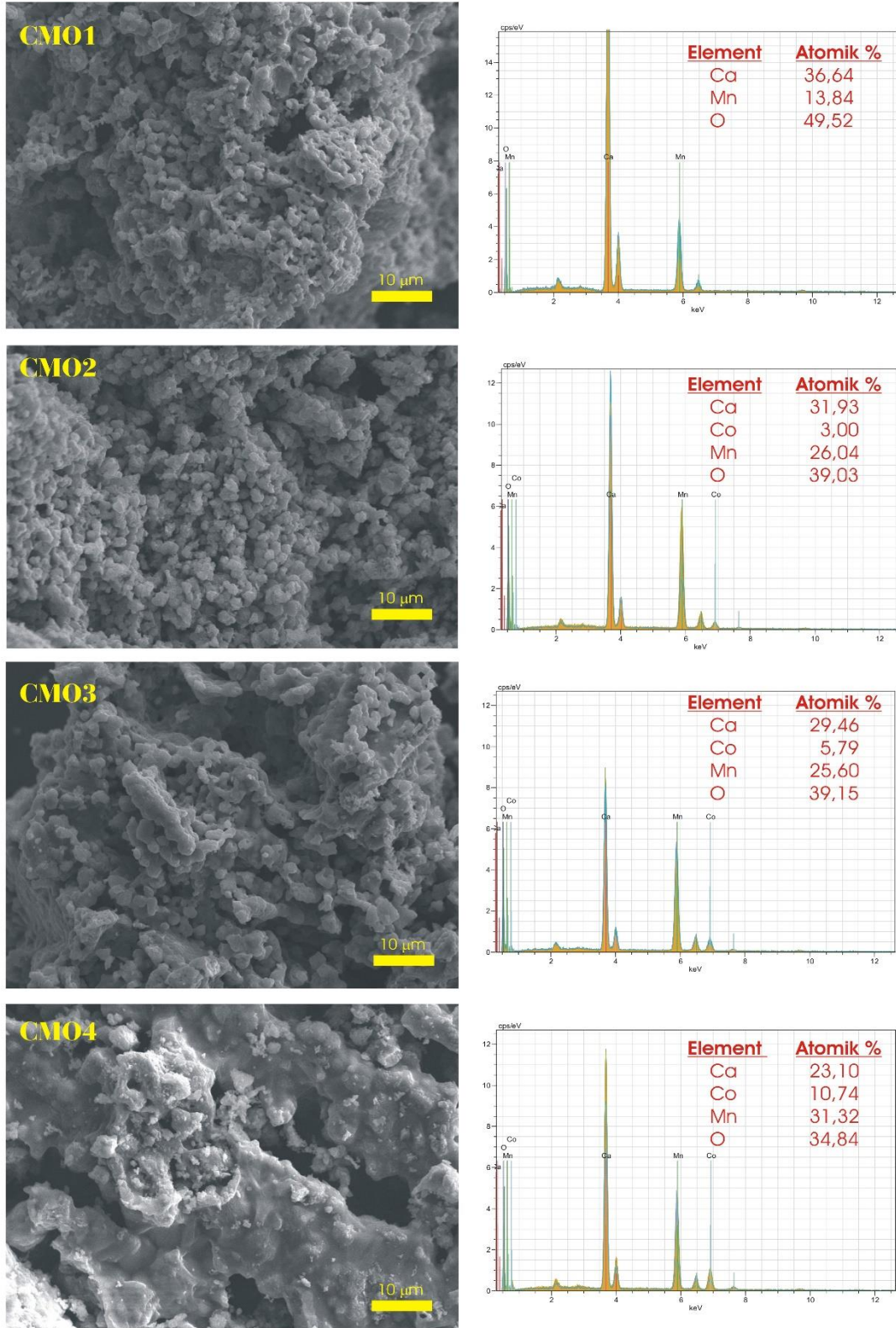
oldukça şiddetli M-O-M gerilme pikleri yaklaşık 400 cm^{-1} ve 510 cm^{-1} , M-O veya M-O-M gerilme piki ise Mn-O bağından kaynaklı olarak $\sim 590\text{ cm}^{-1}$ 'de görülmektedir [27]. Ayrıca 1045 cm^{-1} 'de M-O (M = Ca, Mn) yapısından kaynaklanan zayıf bir pik görülmektedir [28]. Her üç pik CMO2, CMO3 ve CMO4 yapılarında benzer dalga sayısında görülmektedir. Ancak bu piklere ek olarak 510 cm^{-1} 'deki pik yapısında Co katkılması ile bir değişim olmuştur. Bu pikin değeri daha güçlü olan Co-O bağından kaynaklı olarak daha düşük dalga sayısına kaymıştır ve şiddeti artmıştır. Şekil 2'deki $400\text{ cm}^{-1} - 600\text{ cm}^{-1}$ arasındaki pikler istenen peroksit yapısını doğrular niteliktedir [29].



Şekil 2. CMO1, CMO2, CMO3 ve CMO4 numunelerine ait FTIR spektrumları

C. Morfolojik İncelemeler

Sentezlenen CMO1, CMO2, CMO3 ve CMO4 numunelerine ait SEM görüntüleri ve bu görüntü alınan numunelere ait EDX spektrumları sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



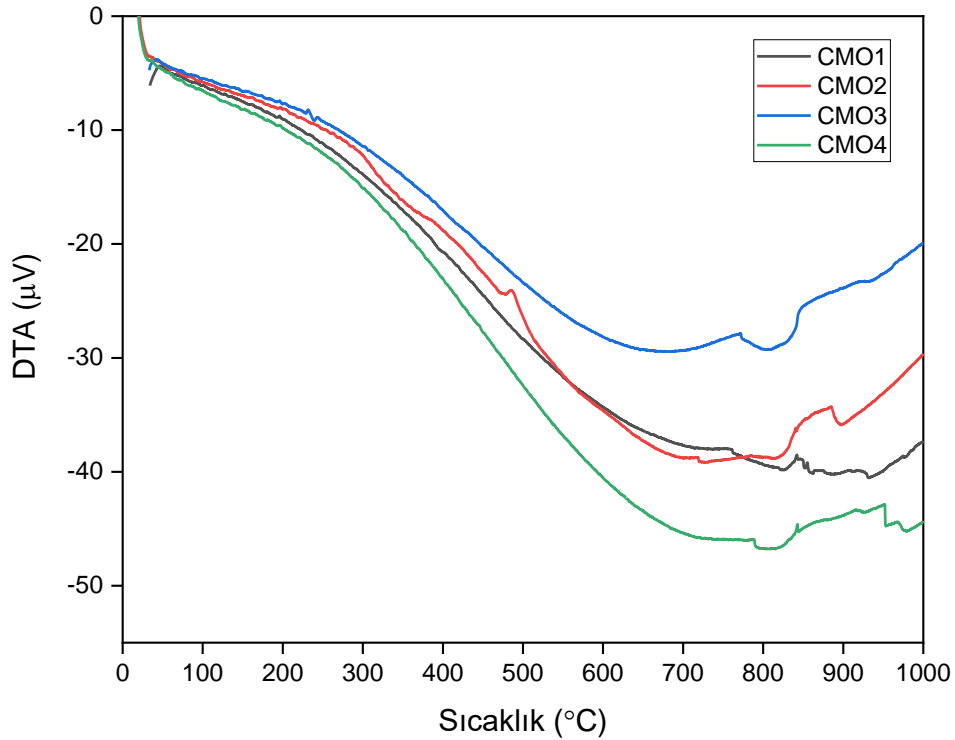
Şekil 3. CMO1, CMO2, CMO3 ve CMO4 numunelerine ait SEM resimleri ve EDX görüntüleri.

Şekil 3'deki CMO1'in SEM görüntüleri incelendiğinde, mikropartiküler parçacık yapısı gözlenmektedir. Kobalt katkılanması ile yapıda morfolojik bir değişim görülmekte olup öncelikle parçacık boyutu büyümekte daha sonra ise CMO4 numunesinde ise monolitik gözenekli bir yapı görülmüştür.

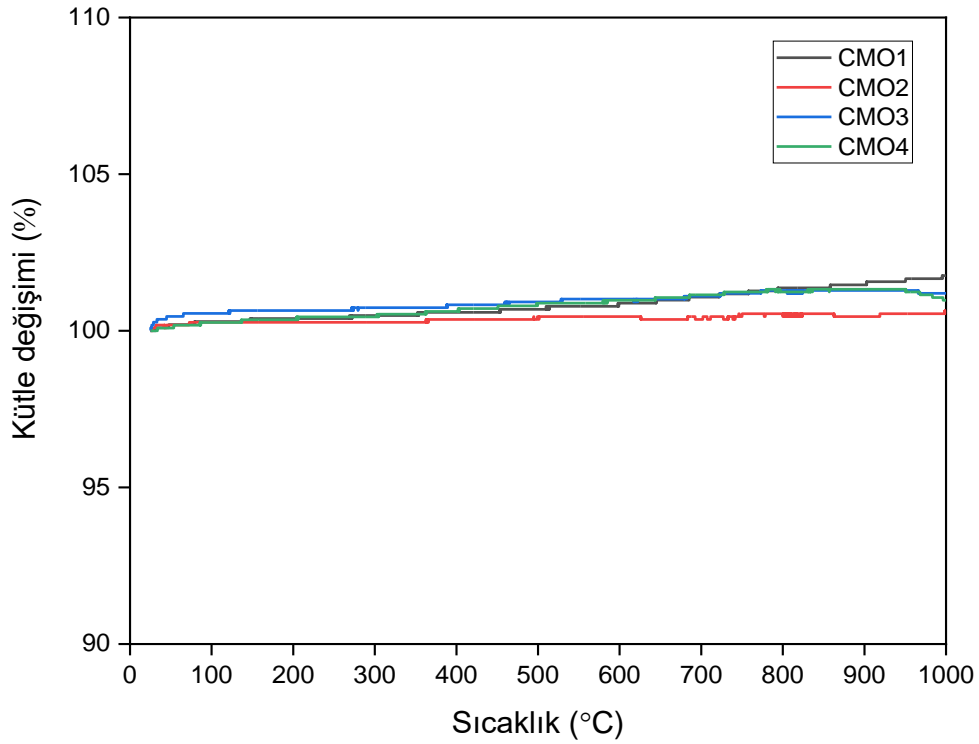
EDX spektrumları, üretilen katkısız CaMnO_3 numunesi (CMO1) ve farklı oranlarda kobalt katkılanmış CMO2, CMO3 ile CMO4 numunelerinin elementel içeriğini ve kobalt katkı oranını belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'deki Saf CaMnO_3 (CMO1) yapısının EDX spektrumunda, Ca, Mn ve O pikleri açıkça görülür. Ca piki, 0,34 ($L\alpha$) ve 3,69 ($K\alpha$) keV'de görülür. CMO1 yapısının EDX spektrumundaki Mn'a ait 0,64 ($L\alpha$) ve 5,90 ($K\alpha$) keV pikleri ile O'ye ait 0,52 ($K\alpha$) keV piki, Ca pikleri ile birlikte yapının elementel içeriğini doğrulamaktadır. CMO2, CMO3 ile CMO4 numunelerinin EDX spektrumlarında Ca, Mn ve O piklerine ek olarak yapıya katkılanan kobaltın pikleri 0,77 ($L\alpha$) ve 6,93 ($K\alpha$) keV değerinde gözlenmiştir. Katkılama miktarına bağlı olarak elementel bulunma oranlarına bakıldığında CMO2'de %3,00, CMO3'te %5,79 ve CMO4'te %10,74 oranında kobalt bulunduğu görülmektedir.

D. Termal Analiz Sonuçları

Üretilen farklı oranlarda kobalt katkılı kalsiyum mangan oksit numunelerinin DTA ve TGA termogramları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verildiği gibidir. Şekil 4'teki DTA termogramında CMO1 numunesinde yaklaşık 820 °C'de bir faz geçişi görülmüştür. Literatürle uyumlu olarak bu faz geçişi ortorombik CaMnO_3 'ün kübik bir faza dönüşümünden kaynaklanmaktadır [30-31]. CMO2, CMO3 ve CMO4 numunelerinin analizinde 780 – 850 °C arasında bu faz geçişi görülmekte olup kobaltın katkılanması ile CaMnO_3 'ün oranının azalmasından kaynaklı olarak pik şiddeti azalmaktadır. Ayrıca kobalt katkılanması ile faz geçiş piki daha düşük sıcaklık değerine (805°C) doğru kaymaktadır [30]. Bu sonuç EDX analizi ile beraber istenilen oranda Co katkılanmasının gerçekleştiğini doğrular niteliktedir.



Şekil 4. CMO1, CMO2, CMO3 ve CMO4 numunelerine ait DTA termogramları.



Şekil 5. CMO1, CMO2, CMO3 ve CMO4 numunelerine ait TGA termogramları.

Şekil 5’deki TGA termogramlarında ise belirgin ve net kütle değişimleri görülmemiştir. Bu sonuç 1050 °C’de 1,5 saat ısıl işlem sonrasında hedeflenen CaMnO_3 ve kobalt katkılı CaMnO_3 yapılarının termal ve yapısal kararlı olarak elde edildiğini göstermektedir.

IV.SONUÇLAR

Bu çalışmada Co katkısının kalsiyum mangan oksit yapıların kristal yapısı, termal özellikleri ve morfolojisi üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, bir adet katkısız ve üç adet artan Co içeriğine sahip numune üretilmiş ve karakterize edilmiştir. XRD sonuçları, kristal büyüklüğünün ve faz bileşiminin Co miktarından belirgin bir biçimde etkilendiğini göstermektedir. FTIR analizleri peroksit yapı oluşumunu doğrular niteliktedir. DTA ve TGA sonuçları, üretilen numunelerin termal olarak kararlı bir yapıya sahip olmalarını göstermesinin yanı sıra, Co katkısının kalsiyum mangan oksit yapının termal özellikleri üzerine etki ettiğini desteklemektedir. SEM gözlemleri, morfolojinin Co katkısından ve bu katkılanan elementin miktarından etkilendiğini göstermektedir. EDX analiz sonuçları, üretilen numunelerin herhangi bir safsızlık içermediğini ve Co elementinin kalsiyum mangan oksit yapı içerisine nüfuz ettiğini işaret etmektedir. Elde edilen tüm analiz sonuçlarına bir bütün halinde bakacak olursak; Co katkılanması kullanılmak suretiyle kalsiyum mangan oksit yapıların kristal büyüklükleri, faz bileşimleri ve morfolojileri kontrol edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Erkişi, A. (2015). *Bazı ABO_3 Tipi Perovskite Yapıdaki Oksit Kristallerin Yapısal, Mekanik, Elektronik ve Manyetik Özelliklerinin Yoğunluk Fonksiyoneli Teorisi ile İncelenmesi*. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [2] Coşkun, F.M. (2016). *Katkılı Perovskit Güneş Pillerinin Üretimi ve Fotovoltaik Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- [3] Paszkowicz, W., Piętosza, J., Woodley, S.M., Dłużewski, P.A., Kozłowski, M., & Martin, C.(2010). Lattice parameters and orthorhombic distortion of CaMnO_3 . *Powder Diffraction*, 25(1), 46-59.
- [4] Pektaş, M. (2011). *La_{0.67}Ca_{0.33}MnO₃ Alaşımında Ag katkılamanın İletkenlik ve Manyetik Özellikleri Üzerine Etikisi*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [5] Zhang, F.P., Zhang, X., Lu, Q.M., Zhang, J.X., Liu, Y.Q., Fan, R.F., & Zhang, G.Z.(2011). Doping induced electronic structure and estimated thermoelectric properties of CaMnO_3 system. *Physica B*, 406, 1258-1262.
- [6] Zhang, F.P., Zhang, X., Lu, Q.M., Zhang, J.X., & Liu, Y.Q. (2011). Electronic structure and thermal properties of doped CaMnO_3 systems. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 4171-4175.
- [7] Dukic, J., Boskovic, S., & Matovic, B.(2009). Crystal structure of Ce-doped CaMnO_3 perovskite. *Ceramics International*, 35, 787-790.
- [8] Wang, K., Jiang, W., Chen, J.N., & Huang, J. Q.(2016). Study of the electronic structure and half-metallicity of $\text{CaMnO}_3/\text{BaTiO}_3$ superlattice. *Superlattices and Microstructures*, 97, 116-124.
- [9] Hamdad, N., & Bouhafs, B.(2010). Theoretical analysis of the spin effect on the electronic and magnetic properties of the calcium manganese oxide CaMnO_3 : GGA+U calculation. *Physica B*, 405, 4595-4606.
- [10] Boskovic, S., Dukic, J., Matovic, B., Zivkovic, L. J., Vljajic, M., & Krstic, V.(2008). Nanopowders properties and sintering of CaMnO_3 solid solutions. *Journal of Alloys and Compounds*, 463, 282-287.
- [11] Pandey, K., Singh, D., Gupta, S.K., Yadav, P., Sonvane, Y., Lukačević, I., Kumar, M., Kumar, M., & Ahuja, R.(2018). Improving electron transport in the hybrid perovskite solar cells using CaMnO_3 -based buffer layer. *Nano Energy*, 45, 287-297.
- [12] Ferreira, N.M., Neves, N.R., Ferro, M.C., Torres, M.A., Madre, M.A., Costa, F.M., Sotelo, A., & Kovalevsky, A. V.(2019). Growth rate effects on the thermoelectric performance of CaMnO_3 -based ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 39, 4184-4188.
- [13] Berbeth Mary, S., Francis, M., Sathe, V.G., Ganesan, V., & Leo Rajesh, A.(2019). Enhanced thermoelectric property of nanostructured CaMnO_3 by sol-gel hydrothermal method. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 575, 411707.
- [14] Liu, K.K., Liu, Z.Y., Zhang, F.P., Zhang, J.X., Yang, X.Y., Zhang, J.W., Shi, J.L., Ren, G., He, T.W., & Duan, J. J.(2019). Improved thermoelectric performance in Pr and Sr Co-doped CaMnO_3 materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 808, 151476.
- [15] Zhang, F.P., Lu, Q.M., Zhang, X., & Zhang, J. X.(2013). Electrical transport properties of CaMnO_3 thermoelectric compound: a theoretical study. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74, 1859-1864.
- [16] Baranovskiy, A., Graff, A., Klose, J., Mayer, J., & Amouyal, Y.(2018). On the origin of vibrational properties of calcium manganate based thermoelectric compounds. *Nano Energy*, 47, 451-462.
- [17] Baranovskiy, A., & Amouyal, Y.(2016). Structural stability of calcium-manganate based $\text{CaO}(\text{CaMnO}_3)_m$ ($m = 1, 2, 3, \infty$) compounds for thermoelectric applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 687, 562-569.
- [18] Phaga, P., Vora-Ud, A., & Seetawan, T.(2012). Invention of Low Cost Thermoelectric Generators. *Procedia Engineering*, 32, 1050-1053.
- [19] Nakh Wong, R.(2016). Preparation and characterization of calcium manganese oxide (CaMnO_3) nanofibers by electrospinning. *Materials Letters*, 163, 222-225.

- [20] Kabir, R., Tian, R., Zhang, T., Donelson, R., Teck Tan, T., & Li, S. (2015). Role of Bi doping in thermoelectric properties of CaMnO_3 . *Journal of Alloys and Compounds*, 628, 347-351.
- [21] Zhu, Y., Wang, C., Wang, H., Su, W., Liu, J., & Li, J. (2014). Influence of Dy/Bi dual doping on thermoelectric performance of CaMnO_3 ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 144, 385-389.
- [22] Kara, F., Kurban, M., & Coşkun, B. (2020). Evaluation of electronic transport and optical response of two-dimensional Fe-doped TiO_2 thin films for photodetector applications. *Optik*, 210, 164605.
- [23] Kurban, M. (2018) Electronic structure, optical and structural properties of Si, Ni, B and N-doped a carbon nanotube: DFT study. *Optik*, 172, 295-301.
- [24] Zhan, B., Lan, J., Liu, Y., Lin, Y., Shen, Y., & Nan, C. (2014). High Temperature Thermoelectric Properties of Dy-doped CaMnO_3 Ceramics. *J. Mater. Sci. Technol.*, 30(8), 821-825.
- [25] Park, J.W., Kwak, D.H., Yoon, S.H., & Choi, S. C. (2009). Thermoelectric properties of Bi, Nb co-substituted CaMnO_3 at high temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 487, 550-555.
- [26] Cullity, B. D. (1978). *Elements of X-ray Diffraction 2nd Ed.* Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 102.
- [27] Nandan, K. R., & Ruban Kumar, A. (2019). Structural and electrical properties of $\text{Ca}_{0.9}\text{Dy}_{0.1}\text{MnO}_3$ prepared by sol-gel technique. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2996-3003.
- [28] Hassan, A. M., Abd El-Wahab, H., Mohy Eldin, A., Naser, A. M., Fouad, O. A., & Wahba, O. A. G. (2011). Synthesis, Characterization and Application of Mixed Metal Oxides Part I= CaMnO_3 , $\text{Ca}_2\text{Cr}_2\text{O}_5$, CaSb_2O_6 . *Egypt. J. Chem.*, 54(4), 447-461.
- [29] Melo Jorge, M.E., Correia dos Santos, A., & Nunes, M.R. (2001). Effects of synthesis method on stoichiometry, structure and electrical conductivity of $\text{CaMnO}_{3-\delta}$. *International Journal of Inorganic Materials*, 3, 915-921.
- [30] Mastronardo, E., Qian, X., Coronado, J. M., & Haile, S. (2019). Fe-doped CaMnO_3 for thermochemical heatstorage application. *AIP Conference Proceedings*, 2126, 210005-1 – 210005-8.
- [31] Goldyreva, E. I., Leonidov, I. A., Patrakeev M. V., & Kozhevnikov, V. L. (2012). Oxygen non-stoichiometry and defect equilibria in $\text{CaMnO}_{3-\delta}$. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 16, 1187-1191.

Araştırma Makalesi – Research Article

Stokastik Talepli Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemine Yönelik Karşılaştırmalı Bir Yaklaşım

Çerkez Ağayeva¹, Melis Alpaslan Takan^{2*}

Geliş / Received: 18/04/2020

Revize / Revised: 06/07/2020

Kabul / Accepted: 06/07/2020

ÖZ

Bu çalışmada literatürde çalışılan en önemli kombinatoriyal eniyileme problemlerinden biri olan stokastik araç rotalama problemi (SARP) ele alınmıştır. Bilindiği üzere klasik araç rotalama probleminde, araçların kapasiteleri ve müşterilerin talepleri bilinmektedir yani problem deterministiktir. Gerçek hayat problemlerinde problem parametreleri farklı durumlara göre değişkenlik gösterdiğinden, parametrelerin kesin değerlerinin bilinmesine az rastlanmaktadır. Bu yüzden belirtilen klasik araç rotalama probleminin belirsizlik koşulları altında formüle edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ele alınan çalışmada, müşteri taleplerinin belirsiz olduğu durumlar için, araç rotalama problemi analiz edilmiştir ve talepler stokastik olarak modelde değerlendirilmiştir. Değişken talep durumlarını incelemek için düzgün, üstel ve Poisson olmak üzere 3 farklı dağılım kullanılarak, bu dağılımların problemin çözümleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hesaplama sonuçları için GAMS yazılımı kullanılmıştır ve çalışmanın sonunda ele alınan problemin stokastik ve deterministik modellerinin sonuçları kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Araç Rotalama Problemi, Düzgün Dağılım, Üstel Dağılım, Poisson Dağılım

¹İletişim: c.agayeva@alparslan.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0507-9785>)

İktisat Bölümü, Muş Alparslan Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Merkez, Muş

^{2*}Sorumlu Yazar İletişim: melis.alpaslan@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1458-8162>)

Endüstri Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gülümbe, Bilecik

A Comparative Approach to Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand

ABSTRACT

In this study, stochastic vehicle routing problem (SVRP), which is one of the most important combinatorial optimization problems studied in the literature, is discussed. As it is known, the capacities of the vehicles and the demands of the customers are known in the classical vehicle routing problem, so the problem is deterministic. Since the problem parameters in real life problems vary according to the different situations, it is rare to know the exact values of the parameters. Therefore, there is a need to formulate the classical vehicle routing problem under uncertainty conditions. In this study, the vehicle routing problem is analyzed, and the demands are stochastically evaluated for the cases where customer demands are uncertain. In order to examine the variable demand conditions, the effects of these distributions on the solutions of the problem are investigated by using three different distributions, which are uniform, exponential, and Poisson. The GAMS software is used for computational results and the results of the stochastic and deterministic models of the problem are compared at the final part of the study.

Keywords- Vehicle Routing Problem, Uniform Distribution, Exponential Distribution, Poisson Distribution

I.GİRİŞ

Araç rotalama problemi (ARP) ilk olarak Dantzig ve Ramser [1] tarafından kamyon dağıtım problemi olarak çalışılmış olup problemin amaç fonksiyonunda bütün müşterilerin taleplerini karşılayan en küçük maliyetli rotaların bulunması hedeflenmiştir. Literatürde NP-zor sınıfında sıklıkla çalışılan araç rotalama problemi türleri; klasik ARP, açık uçlu ARP, bölünmüş talepli ARP, zaman pencereci ARP, önce dağıt- sonra topla ARP, heterojen filolu ARP vb. [2]. Son zamanlarda klasik araç rotalama problemlerinin yanı sıra stokastik araç rotalama problemleri de incelenmektedir. Problemin parametrelerinin özellikleri ve farklı kısıtlar altında incelenmesi çeşitli stokastik araç rotalama problemlerini oluşturur.

Önceden belirtildiği gibi, klasik araç rotalama problemi deterministik bir problem olduğundan gerçek hayat ulaştırma ve lojistik problemlerindeki değişim durumlarını tam olarak yansıtamamaktadır. Belirsizlik durumları, neredeyse bütün gerçek hayat problemlerinde karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden problemdeki talep, mesafe ve zaman gibi bazı parametrelerin stokastik olarak ele alınması daha gerçekçi olmaktadır. Bu gibi stokastik durumlarda doğrusal programlama yöntemleri ele alınamamaktadır ve rassal değişkenlerin olduğu problemler ve buna bağlı gelişen stokastik ortam, stokastik programlama yaklaşımları ile ele alınarak çözülebilmektedir. Stokastik araç rotalama problemi günlük hayatta farklı alanlarda yer almaktadır. Örneğin; belediyelerin çöp toplama hizmetleri, insani yardım lojistiği, çay-kahve makinelerinin otomatlarının stoklarının belirlenmesi, farklı evlere yakıt dağıtımı vb.

SARP'nin en yaygın türü stokastik müşteri talepli araç rotalama problemidir [3,4] ve probleme yönelik literatürde farklı çalışmalar yer almaktadır. Örneğin Yang vd. [5] stokastik müşteri taleplerini yeniden stoklama üzerine; Smith vd. [6] ise çoklu araç önceliği ile stokastik talepli dinamik araç rotalama problemi üzerinde çalışmıştır. Bertsimas [7], stokastik talepli problemi, farklı rota güncelleme stratejileri ile ele almıştır. Tripathivd. [8] karınca tabanlı simülasyon ile stokastik talepli ARP'yi analiz etmiştir. Erera vd. [9] problemi süre kısıtları ile ele almıştır. Moghaddam vd. [10] probleme yönelik geliştirilmiş parçacık sürü eniyileme tekniğini kullanmıştır. Kenyon ve Morton [11] stokastik servis zamanlı ve yolculuk zamanlı problem üzerinde çalışmıştır. Goodson [12] çok bölmeli araç rotalama problemini çözebilmek için döngüsel düzenli tavlama benzetimi prosedürünü analiz etmiştir. Müşteri talepleri karşılanmadığında rotada hata olduğundan, tanımlı yenileme (recourse) hareketi (örneğin depoda ikmal gibi) yapılmalıdır Bu yüzden Bertsimas [13] ve Gendreau vd. [14] probleme yönelik iki aşamalı yöntemi uygulamışlardır. En yaygın yöntemler şans kısıtı programlama yöntemi ve yenileme ile stokastik programlama yöntemidir. Stokastik müşteri talepli ve stokastik servis zamanlı araç rotalama problemi için bir çalışma Campbell vd. [15] tarafından yapılmıştır. Laporte ise stokastik servis zamanı üzerinde yoğunlaşmıştır ve probleme yönelik kesin ve yaklaşık çözüm yöntemlerini analiz etmiştir [16]. Guo ve Mak, zaman pencereci stokastik araç rotalama problemi için bir sezgisel algoritma çalışmıştır [17]. Dinh vd.[18], müşteri taleplerinin stokastik olduğu araç rotalama problemleri için şans kısıtlı yöntemleri uygulamışlardır. Calvet vd. [19], heterojen filolustokastik araç rotalama problemini incelemişlerdir. Bu problemde, tüm araç türleri her müşteriye hizmet verememekte, stokastik müşteri talepleri bulunmakta ve asimetric ağ yapısı vardır. Problemin çözümünde, tekrarlanan yerel arama algoritması ve Monte Carlo simülasyonu yöntemleri kullanılmıştır. Calvet vd. [20], çoklu depolu araç rotalama problemini ele almışlardır. Problemde, sınırlı depo kapasitesi ve stokastik müşteri talepleri bulunmaktadır.

SARP'nin sınıflandırılması yapılan çalışmalarda incelenmiş ve Tablo 1'de analiz edilmiştir [21]. Bu tabloya göre stokastik araç rotalama problemi farklı gruplara ayrılmaktadır. Birinci bölümde araç rotalama probleminde hangi kısmın stokastik olabileceği belirtilirken, ikinci bölümde stokastik problemin çözüm yöntemleri gösterilmiştir. Üçüncü kısımda ise grafik gösterim yani problemin ağ yapısından bahsedilmektedir. Eğer müşteriler arası mesafeler biliniyorsa ve i 'den j 'ye gidiş ile j 'den i 'ye gidiş mesafesi aynı ise problemin ağ yapısı simetrik, aynı değilse ağ yapısı asimetric olarak adlandırılmaktadır. Tablonun dördüncü kısmında ise veri tipinden bahsedilmektedir. Kullanılan veriler, gerçek hayattan alınmış olabilir veya bir probleme göre uyarlama yapılmış veridir. Araç sayıları problemde tek olabilir (gezgün satıcı problemi), birden fazla olabilir ya da araç sayısı bilinmiyor olabilir. Araç kapasiteleri de probleme bağlı olarak kısıtlı ya da sonsuz kapasiteli olabilir. Bazı problemlerde ise kapasite bilinmeyebilir. Amaç fonksiyonları ise literatürde yine farklılık gösteren bir diğer unsurdur. Örneğin; toplam maliyetin en küçüklenmesi, toplam mesafenin en küçüklenmesi, toplam rota zamanının en küçüklenmesi veya elde edilecek karın en büyüklenmesi gibi. Stokastik araç rotalama probleminde

çalışılan yöntemler ise, şans kısıtlı programlama, dinamik programlama, markov zinciri, stokastik yenileme (stochastic with recourse) gibi yöntemlerdir.

Tablo 1. SARP'nin sınıflandırılması [21]

1 Stokastik Problem 1.1 Stokastik müşteri 1.2 Stokastik müşteri talebi 1.3 Stokastik servis zamanı 1.4 Stokastik seyahat zamanı	2 Çözüm 2.1 Kesin 2.2 Sezgisel 2.3 Diğer
3 Grafik Gösterimi 3.1 Simetrik 3.2 Asimetrik 3.3 Bilinmeyen	4 Veri tipi 4.1 Gerçek veri 4.2 Sentez veri 4.3 Veri olmaması
5 Araç sayısı 5.1 Tek araç 5.2 Çok araç 5.3 Bilinmeyen araç sayısı	6 Araç kapasitesi 6.1 Kapasite kısıtlı 6.2 Kapasite kısıtsız 6.3 Bilinmeyen kapasite
7 Amaç fonksiyonu 7.1 Enküçükleme 7.1.1 Maliyet enküçükleme 7.1.2 Uzaklık enküçükleme 7.1.3 Zaman enküçükleme 7.2 Enbüyüklenme 7.3 Diğer	8 Uygulanan modeller 8.1 Şans kısıtlı programlama 8.2 Dinamik programlama 8.3 Markov zinciri 8.4 Stokastik yenileme (stochastic with recourse)

Bu çalışmada, stokastik talepli araç rotalama problemi ele alınmıştır. Belirsizliklerin kaynağı bu problem için talep olduğundan, bu belirsizlikler farklı dağılımlar ile ifade edilmiştir. Düzgün, üstel ve Poisson dağılım kullanılmış, farklı dağılımların problem üzerindeki etkileri gözlemlenmek istenmiştir. Böylece literatürde farklı çalışmalarda yapılan tek bir dağılım ile analiz etmenin yerine üç farklı dağılım kullanılarak probleme farklı bir bakış açısı sunulmuştur. Çalışmanın ikinci bölümünde araç rotalama probleminin matematiksel modeli detaylıca anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde, GAMS programı kullanılarak elde edilen hesaplamalı sonuçlar verilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise sonuç ve önerilerden bahsedilmektedir.

II. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ

Literatürde ele alınan klasik araç rotalama problemi aşağıdaki şekildedir.

Notasyon

n: toplam müşteri sayısı

K: toplam araç sayısı

i, j, m: müşteri indisi i, j, m={0,...,n}. 0 depo noktası.

k: araç indisi k={1,...,K}

d_i: i müşterisinin talep miktarı

Q_k: k aracının kapasitesi

c_{ij}: i müşterisinden j müşterisine gitme maliyeti

Karar Değişkenleri

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ aracı } i \text{ müşterisinden } j \text{ müşterisine giderse} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

u_i, u_j : alttır engelleme kısıtlarında kullanılan pozitif değişkenler

Bu gösterimler altında, problemin matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu

$$z = \sum_{i=0}^n \sum_{j \neq i}^n \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j \neq i}^n d_i x_{ijk} \leq Q_k \forall k \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{imk} - \sum_{j \neq i}^n x_{mj k} = 0 \quad m = 1, \dots, n; \forall k \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^K x_{ijk} = 1 \quad j \neq i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$u_i - u_j + n \sum_{k=1}^K x_{ijk} \leq n - 1 \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n, j \neq i \quad (5)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (6)$$

Modeldeki amaç fonksiyonu (1) toplam rota mesafesinin enküçülenmesini ifade etmektedir. Kısıt (2) ise araç kapasite kısıtını yani rotanın toplam kapasitesinin, araç kapasitesini aşamayacağını ifade eder. Araç akış kısıtı olarak bilinen kısıt (3) ise şunu ifade etmektedir: eğer araç m müşterisinden n müşterisine giderse, aynı araç m müşterisinden n müşterisine (ya da depoya) gider. Problem, klasik rotalama problemi olduğundan, araçlar kapasiteleri dolduğunda depoya dönmek zorundadır. Kısıt (4) her müşteriye mutlaka ve sadece bir aracın uğraması gerektiğini belirtir. Miller vd. [22] tarafından geliştirilen kısıt (5) alttır engelleme kısıtıdır. (6). kısıt ise 0-1 tamsayılı değişkenleri ifade eder.

A. Kullanılan Yöntem

Yukarıda incelenen klasik araç rotalama probleminin modelindeki c_{ij}, d_i, Q_k parametreleri deterministiktir. Bu modelin ele aldığımız stokastik karşılığında, taleplerdeki belirsizlik durumlarını göz önünde bulundurmamak için, talep değerleri rassal değişkenler ile ele alınmıştır. Çeşitli belirsizlik durumlarını dikkate almak için, talepler; düzgün, üstel ve Poisson dağılımı olmak üzere üç farklı yaklaşım ile analiz edilmiştir. Aşağıda bu dağılımların uygulama detaylarından bahsedilmektedir:

1) *Düğüün dağılım*: Taleplerin homojen bölünmesine karşılık gelen durumları ifade eder ki, biz çalışmada en küçük talep ile en büyük talep ($[d_{min}, d_{max}]$) aralığında tanımlanan yani olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki şekilde olan rassal değişken ele alınmaktadır.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [d_{min}, d_{max}] \\ \frac{1}{d_{max} - d_{min}}, & x \in [d_{min}, d_{max}] \end{cases} \quad (7)$$

X rassal değişkenin beklenen değeri $E(X) = \frac{d_{min} + d_{max}}{2}$, varyansı ise $Var(X) = \frac{(d_{max} - d_{min})^2}{12}$ şeklindedir.

2) *Üstel dağılım*: Kuyruk teorisinde, sıralama problemlerindeki ardışık olayların incelenmesinde önemli rol oynayan üstel dağılımın parametresinin farklı değerleri, çeşitli gerçek durumlara karşılık gelmektedir. Bu problemde parametrenin doğru değerinin seçimi çok önemlidir. Bu yüzden farklı yaklaşımlar kullanılabilir. Bu çalışmada parametre olarak her bir test problem için taleplerin ortalama değerleri kullanılmıştır. Böylece

$\lambda > 0$ parametresi bulunan ortalamanın tersi olacak şekilde tanımlanmış olur ki bu rassal değişkenin beklenen değeri ve varyansı sırasıyla; $E(X) = \frac{1}{\lambda}$ ve $Var(X) = \frac{1}{\lambda^2}$.

3) *Poisson Dağılım*: Sürekli zaman aralığında etkili olan üstel dağılımdan farklı olarak değil, kesikli zaman anlarında incelenen durumlar için genellikle Poisson dağılımı kullanılır. $\lambda > 0$ parametresi ortalama taleplere göre bulunan Poisson dağılımının kütle fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$P(X = n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Bu rassal değişkenin ortalama değeri ve varyansı: $(X) = \lambda, Var(X) = \lambda$.

III. HESAPLAMALI SONUÇLAR

Modele belirsizliğin dahil olmasının sonuçlara etkisini analiz ederken yukarıda belirtilen dağılım türleri için Christofides vd. [23] tarafından oluşturulan test problemleri ele alınmıştır. Bu veri setini kullanarak uygun stokastik modeller oluşturulmuş ve GAMS programı yardımı ile çözülmüştür. Parametrelerin seçimi sonuçları etkilediği için farklı test problemlerinin stokastik modele dönüştürülmesinde çeşitli yaklaşımlar kullanılabilir. Bahsedilen test problemlerinin müşteri koordinatları ve araç kapasiteleri alınarak müşteri talepleri farklı dağılımlar şeklinde (düzgün, üstel ve Poisson dağılımları) ele alınmıştır. Çalışmada 9 adet test problemi incelenmiş ve uygun dönüşümler yapılarak elde edilen hesaplama sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Dağılımlara göre test problemlerinin analizi

Problem	Ortalama Talep Değerleri	Deterministik Çözüm	Düzenli Dağılım	Üstel Dağılım	Poisson Dağılım
E016-03m	16.125	278	278	238	219
E016-05m	16.125	345	345	259	238
E021-04m	15.66	366	362	292	295
E021-06m	15.66	606	606	571	580
E022-04m	1022.72	382	380	278	288
E022-06m	1022.72	551	551	378	388
E023-03m	443	568	568	470	470
E023-05m	443	568	568	470	470
E026-08m	14.11	859	840	685	714

Tablo 2’deki ilk sütun hangi test probleminin çalışıldığını göstermektedir. İkinci sütun test problemlerinin ortalama müşteri taleplerini belirtmektedir. Bu ortalamalar her test problemi için hesaplanmıştır. Üçüncü sütun problemlerin deterministik (stokastiğe dönüştürülmemiş) çözümlerini belirtir. Sonraki sütunlar ise belirsizlik etkisi altında incelenen problemlerin çözümleridir. Birinci sütundaki test problemlerinin isimleri problemdeki müşteri ve araç adetlerini belirtmektedir (örneğin E016-03m test probleminde, 16 adet müşteri ve 3 adet araç olduğunu gösterir). Elde edilen çözümler bulunan en küçük toplam rota maliyetini belirtmektedir. Problemin deterministik halinde GAMS programının çalışma süresi her bir test problem için 2 saat verilmiştir. Çıkan sonuçlar 2 saatin sonuçlarına göre çıkan en iyi çözümlerdir. E016-03m test probleminde ortalama talep değerleri 16.125’dir. Problemin deterministik çözümünde en iyi çözüm 278 olarak bulunmuştur. Düzenli dağılım ile problemin talep değerleri ele alındığında toplam rota maliyeti 278, üstel dağılım ile 238 ve Poisson dağılım ile 219 bulunmuştur. Böylece Poisson dağılım ile en küçük rota maliyeti elde edilmiştir. Müşteri taleplerinin Poisson dağılıma uyması diğer yöntemlere göre bu problemde daha avantajlıdır. E22-04m test problemine baktığımızda ise çıkan sonuçlara göre üstel dağılım diğerlerinden daha üstündür ve en küçük rota maliyeti 278 olarak bulunmuştur. E23-05m test probleminde ise üstel dağılım ve Poisson dağılım toplam rota maliyetini 470 olarak hesaplamıştır. Düzenli dağılım ise deterministik çözüm ile aynı değeri elde ederek 568 değerini bulmuştur. Bu test probleminde üstel dağılımın ve Poisson dağılımın çözüme etkisi aynı olmuştur. Tablo 2’den

görüldüğü gibi genel olarak taleplerin düzgün dağılıma uyan stokastik karşılığı deterministik çözümle yakın sonuçlar vermektedir.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında literatürde sıklıkla rastlanan stokastik talepli araç rotalama problemi ele alınmıştır. Günümüzde gerçek hayat problemlerinde, ani ve beklenmeyen değişimler ile çok fazla karşılaşıldığından, bu durumların ifade edilmesinde stokastik modellerin önemi büyüktür. Bu modellerde önceden önemsenmeyen veya umulmayan etkilerin dikkate alınması vurgulanmaktadır. Bu yüzden stokastik modeller deterministik modellere göre gerçek hayatı daha iyi yansıtmaktadır. Ele alınan problemin gerçek hayatta farklı uygulama alanları mevcuttur. Örneğin; benzin istasyonlarının arzı, çöp toplama arabalarının rotalanması, belirli bir zaman aralığında bir yoldan geçen arabaların sayısı, belirli bir zaman aralığında bir yoldan geçen müşterilerin sayısı vb.

Belirsizliklerin kaynağı farklı nedenler olduğu için bu belirsizlikler çeşitli dağılımlarla ifade edilir. Yukarıda da gösterildiği gibi klasik araç rotalama problemindeki farklı parametreler (zaman, yol, talep, kapsam vb.) gerçek hayatta tam ve kesin olarak bilinmemektedir ve bunlar belirtilen modelin çeşitli stokastik karşılığını doğurmaktadır. Bu çalışmada müşteri talepleri stokastik kabul edilerek ve üç farklı dağılıma uyarlanarak incelenmiştir. 9 farklı test problemi üzerinde GAMS programındaki CPLEX çözücüsü ile alınan sonuçlar kıyaslanmış ve analiz edilmiştir. Tablo 2 sonuçları analiz edilerek aşağıdaki bulgulara erişilmiştir:

- Taleplerin düzgün dağılımla ele alınmasıyla elde edilen sonuçları ile deterministik çözümleri birbiriyle benzemektedir.
- Müşteri sayısı fazla olduğunda tüm yaklaşımlar benzer sonuç vermektedir.
- Test problemlerine göre dağılımların üstünlükleri değişmektedir.

Bu sorunları analiz ederek aşağıdaki çözüm yaklaşımları geliştirilebilir:

- Taleplerin düzgün dağılıma farklı yaklaşımla simüle edilmesi gerekmektedir.
- Müşteri sayısının fazla olduğu problemlerde iki aşamalı çözüm yöntemleri denenebilir. Öncelikle benzer taleplere (talep noktalarının yakınlığı, taleplerin yakın değerleri vb.) göre farklı kümeleme yöntemleri kullanılarak sınıflandırma yapılmalı, daha sonra elde edilen bu sınıfların karakteristikleri göz önünde bulundurularak problem yeniden çözülebilir. Farklı sezgisel veya metasezgisel algoritmalar kullanılarak daha büyük boyutlu araç rotalama problemleri üzerinde çalışılabilir.
- Çözüm yaklaşımlarının test problemlerine göre farklılığının nedenleri araştırılmalı ve her bir dağılım için uygun problem türleri belirtilmelidir.

Gelecek çalışmalarda yukarıda belirtilen sorunları dikkate alarak stokastik araç rotalama probleminin daha detaylı incelenmesi hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra farklı araç rotalama problem türleri (heterojen filolu, açık uçlu, bölünmüş talepli vb.) ele alınabilir ve her problem sınıfı için uygun yaklaşımlar belirlenebilir. İleriki çalışmalarda probleme süre kısıtları da eklenerek çeşitli analizler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Dantzig, G.B., & Ramser, J.H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Inform*s, 6, 80-91.
- [2] Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*, Bologna, SIAM.
- [3] Dror M., & Trudeau, P.. (1989). Savings by Split Delivery Routing. *Transportation Science*, 23, 141-145.
- [4] Laporte, G., Louveaux, F., & Mercure, H., (1989). Models and exact solutions for a class of stochastic location routing problems. *European Journal of Operational Research*, 39, 71-78.
- [5] Yang, W-H., Kamlesh M., & Ronald, B.H. (2000). Stochastic vehicle routing problem with restocking. *Transportation Science*, 34, 99-112.

- [6] Smith, S.L., Pavone, M., Bullos, F., & Frazzoli, E. (2010). Dynamic vehicle routing with priority classes of stochastic demands. *IAM Journal on Control and Optimization*, 48(5), 3224–3245.
- [7] Bertsimas, D. (1991). A vehicle routing problem with stochastic demand. *Journal of Operations Research*, 40(3), 554–585.
- [8] Tripathi, M., Kuriger, G., Wan, H. (2009). *An ant based simulation optimization for vehicle problem with stochastic demands*. 2009 Winter Simulation Conference, December 13-16, Austin, USA.
- [9] Erera, A.L., Morales, C.J., & Savelsbergh, M. (2010). *The vehicle routing problem with stochastic demand and duration constraints. Report*, The Supply Chain and Logistics Institute, Georgia Institute of Technology School of Industrial and Systems Engineering Atlanta, GA.
- [10] Moghaddam F.B., Babak, R.R., & Sadjadi J.S. (2012). Vehicle routing problem with uncertain demands: An advanced particle swarm algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 62, 306–317.
- [11] Kenyon, S.A., & Morton, P.D. (2003). Stochastic vehicle routing with random travel times. *Journal of Transportation Science*, 37(1), 69–82.
- [12] Goodson, J.C., Ohlmann, J.W., & Thomas, B.W. (2012). Cyclic-order neighborhoods with application to the vehicle routing problem with stochastic demand. *European Journal of Operational Research*, 217(2), 312–323.
- [13] Bertsimas, D. (1992). A vehicle routing problem with stochastic demand. *Operations Research*, 40, 574–585.
- [14] Gendreau, M., Laporte, G., & Sèguin, R. (1996). Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 88, 3–12.
- [15] Campbell, M.A., Gendreau M., & Thomas, B.W. (2011). The orienteering problem with stochastic travel and service Times. *Annals of Operations Research*, 186, 61–81.
- [16] Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 345–358.
- [17] Guo, Z., Mak, K.L. (2004). *A heuristic algorithm for the stochastic vehicle routing problems with soft time windows*. Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation, IEEE, 19-23 June, Portland, USA.
- [18] Dinh, T., Fukasawa, R., Luadtka, J. (2018). Exact algorithms for the chanceconstrained vehicle routing problem, *Mathematical Programming*, 172(1- 2), 105-138.
- [19] Calvet, L., Bernaus, A.P., Travessat-Baro, O., Juan, A.A. (2016). A Simheuristic for the heterogeneous site-dependent asymmetric VRP with stochastic demands, *Advances in Artificial Intelligence*, 408-417.
- [20] Calvet, L., Wang, D., Juan, A., Bove, L. (2019). Solving the multidepot vehicle routing problem with limited depot capacity and stochastic demands, *International Transactions in Operational Research*, 26, 459-484.
- [21] Berhan, E., Beshah, B., Kitaw, D., & Abraham, A. (2014). Stochastic vehicle routing problem: a literature survey. *Journal of Information and Knowledge Management*, 13 (3), 1450022:1-12.

- [22] Miller, C. E., Tucker, A. W., & Zemlin, R. A. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems, *Journal of the ACM*, 7 (4), 326-329.
- [23] Christofides, N., Mingozzi, A., & Paolo, T. (1981). Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations. *Mathematical Programming*, 20 (1), 255-282.

Araştırma Makalesi - Research Article

Farklı Miktarlarda Seryum ve Silisyum İçeren Alüminyum Alaşımlarının Karşılaştırılması

Sezgin Cengiz^{1*}

Geliş / Received: 19/04/2020

Revize / Revised: 14/08/2020

Kabul / Accepted: 15/08/2020

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında sınırlı seviyede kullanılabilen ticari Al-Si alaşımlarına iyi bir alternatif olabilecek Al-Ce alaşımlarının sentezlenmesi ve mikroyapısal açıdan incelenmesidir. Bu kapsamda ticari olarak Al-9Si Al-12,5Si ve Al-18Si (ağırlıkça % Si) alaşımlarıyla, Al-13,5Ce, Al-18Ce ve Al-27Ce (ağırlıkça % Ce) alaşımları karşılaştırılmıştır. Al-Si alaşımlarında α -Al, ötektik Al-Si, birincil Si yapıları, Al-Ce alaşımlarında ise α -Al, ötektik ince $Al_{11}Ce_3$ ve birincil kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik parçacıklarının olduğu tespit edilmiştir. Al-Ce alaşımı içerisine katkılanırılan Ce miktarı artışına bağlı olarak ötektik $Al_{11}Ce_3$ fazı azalırken, kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik yapılarının miktarı ve iriliği artmaktadır. Alaşım içerisine katkılanırılan alaşım elementleri miktarının artışı, alaşımların sertlik değerlerini arttırmıştır. Bu iki alaşım grubunun sertlik değerleri karşılaştırıldığında Al-Si alaşımlarının sertlik değerleri Al-Ce alaşımlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Alüminyum Alaşımları, Seryum, Silisyum, Ötektik Faz, Mikroyapı, Sertlik

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: scengiz@gtu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4236-7084>)
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, Kocaeli, Türkiye

Comparison of Different Amount of Cerium and Silicon in Aluminum Alloys

ABSTRACT

The aim of this study is the synthesis and the microstructural investigation of Al-Ce alloys, which can be a good alternative to commercial Al-Si alloys that can be used at a limited level especially in high temperature applications. Within this context, commercially available Al-9Si, Al-12.5Si and Al-18Si (wt. % Si) alloys and Al-13.5Ce, Al-18Ce and Al-27Ce (wt. % Ce) alloys were compared. While α -Al, eutectic Al-Si, primary Si structures were observed in Al-Si alloys; α -Al, eutectic fine $Al_{11}Ce_3$ and primary coarse $Al_{11}Ce_3$ intermetallic particles were identified in Al-Ce alloys. In addition, while $Al_{11}Ce_3$ phase decreased depending on the increase of added Ce amount in Al-Ce alloy, the amount and size of coarse $Al_{11}Ce_3$ intermetallic structures increased. The increase in the amount of alloying elements added to the alloy increased the hardness values of the alloys. When the hardness values of these two alloys group were compared, it was observed that the hardness values of Al-Ce alloys were lower than that of Al-Si alloys.

Keywords- Aluminum Alloys, Cerium, Silicon, Eutectic Phase, Microstructure, Hardness

I.GİRİŞ

Alüminyum alaşım grupları içerisinde en çok kullanılan ve yaklaşık olarak üretilen tüm alaşımların %80-90'nına tekabül eden silisyum eklentili Al-Si döküm alaşımları, düşük üretim maliyetleri, kolay dökülebilir olması, yüksek özgül mukavemet ve geri dönüştürülebilir olma kolaylığı gibi nedenlerden dolayı, özellikle oda sıcaklığında ve alüminyum için oldukça yüksek sıcaklık olarak kabul edilen yaklaşık olarak 200 °C'ye kadar çalışan otomotiv bileşenleri üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Al-Si alaşımlarını ötektik altı (hypo- % 12,6 Si miktarının altında), ötektik (% 12,6 Si) ve ötektik üstü (hyper- % 12,6 Si miktarının üzerinde) olarak üçe ayırmak mümkün olup farklı uygulamalarda kullanılabilir. Al-Si alaşımlarının oda ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerinin daha da geliştirilmesi amacıyla Cu ve Mg gibi alaşım elementleri ile zenginleştirilmektedirler. Cu ve Mg gibi döküm alaşım elementleri, alaşım mikroyapısını, ötektik Si çökeltilerini veya parçacıklarını modifiye etmekte, Al_2Cu , Mg_2Si ve demirce zengin intermetaliklerin oluşmasına katkı sağlayarak alaşımın mekanik özelliklerinin iyileşmesine yol açtıkları raporlanmıştır [4, 5]. Otomotiv ve uzay endüstrisinde artan talepler ve bu taleplerin doğrultusunda kullanılan malzemelerden beklenen yeni özellikler, Al-Si gibi üstün özelliklere sahip alaşım grupları için bile karşılanması oldukça güç yeni taleplerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Özellikle içten yanmalı motorlarda, yakıtın daha verimli yakılması konusunda yüksek basınç ve sıcaklıklara kadar çıkan motor ve motor aksamı parçalarının yüksek kullanım sıcaklıklarında bile oda sıcaklıklarındaki mekanik, ısıl ve mikroyapı özelliklerinin kararlı olarak sabit tutulabilmesi son dönemde alaşımlardan beklenen yeni talepler olarak görülmektedir [6, 7]. Alüminyum alaşımları için yüksek sıcaklık olarak kabul edilen 230 °C'nin daha üstündeki sıcaklıklarda alaşım içerisinde bulunan Si parçacıkları daha da kabalaşmakta, Cu ve Mg gibi mekanik özellikleri daha da artırması amacıyla katkılanırlan elementlerin oluşturduğu Al_2Cu ve Mg_2Si çökeltileri de matris fazı içerisinde ya kabalaşmakta ya da tamamen çözünmekte olup, yüksek sıcaklık kullanımlarında Al-Si alaşımlarıyla yapılmış parçaların mekanik özelliklerinin zayıflamasına neden olmaktadır [5-8].

Özellikle daha yüksek sıcaklıklarda kullanıma sunulması amacıyla, Al-Sc ve Al-Zr bazlı alaşımlar sentezlenmiş ve bu alaşımlarda uyumlu L_{12} nano çökelti yapıları oluşturularak özellikle yüksek ısıl kararlılığı ve çökeltilerin kabalaşmasına karşı dirençli alaşımların hazırlanması başarılmıştır. L_{12} çökeltilerinin, özellikle 300-400 °C'de bile dislokasyonların tırmanma hareketlerini engelledikleri için alaşımların sürünme dirençlerini iyileştirdiği raporlanmıştır. Ancak, 300-400 °C'de uzun süre kullanılan bu alaşımlarda bulunan nano parçacıkların kabalaştığı, alaşım içerisindeki miktarlarının azaldığı ve sıcaklık etkisi ile gerçekleşen faz dönüşümleri neticesinde oluşan yeni parçacıkların ise matris yapıyla uyumsuzluklara neden olduğu için sürünme direncinden önemli kayıplara sebep olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [9, 10].

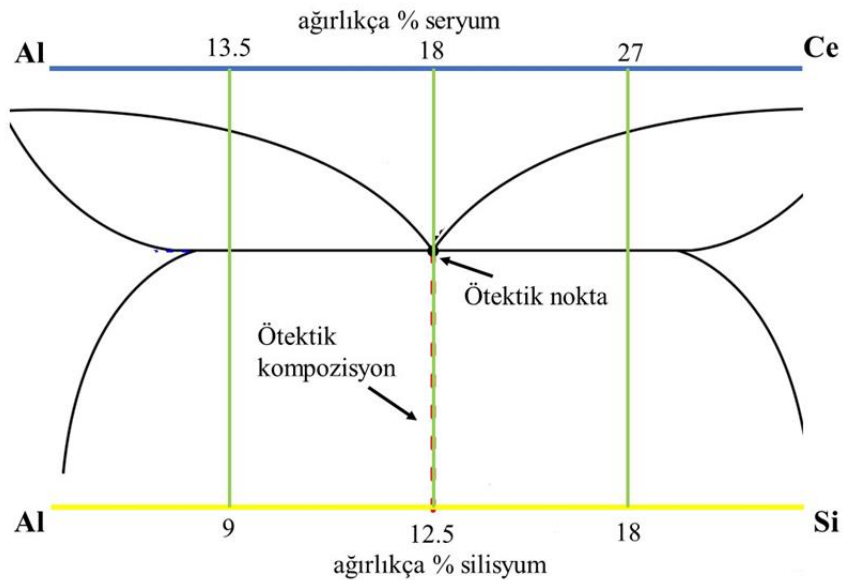
Son yıllarda ise, alüminyum alaşımlarında ana alaşım elementlerinden biri olmayan, alüminyum içerisindeki çözünürlüğü çok kısıtlı (ağırlıkça %0,005) seryum elementinin, alüminyum içerisindeki difüzyon hızı düşük olması ve özellikle alüminyum alaşımları için yüksek sayılabilecek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini kararlı şekilde koruyabileceği ortaya atılmıştır [11, 12]. Alüminyum içerisine ağırlıkça % 6-12 arasında Ce katkılanırlan alaşımların döküm kabiliyetlerinin Al-Si alaşımları kadar iyi olduğu, bunun özellikle seri üretim ve döküm kalıbı boşluğu doldurmak için önemli olduğu, oda sıcaklığında ve oda sıcaklığından 315 °C'ye kadar olan farklı sıcaklıklarda yapılan çekme testi sonuçlarına göre elde edilen değerlerin ticari olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından daha iyi olduğu raporlanmıştır [12, 13]. Al-12,5Ce ikili alaşımı 8 hafta 322 °C'de ve 12 hafta boyunca 400 °C'de bekletildiğinde mikrosertlik değerlerinde herhangi bir değişim tespit edilmemiş olup, alaşımın içerisinde bulunan ince $Al_{11}Ce_3$ lamellerinin kabalaşmadan yapıyı güçlendirdiği belirlenmiştir [9].

Ticari olarak kullanılan Al-Si alaşımlarına özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında önemli bir alternatif olması beklenen seryum katkılı alaşımlar üzerine şu anada kadar kısıtlı çalışmalar yapılmış olmak ile beraber, gelecek dönemde seryumun ticarileşebilme ihtimallerinden dolayı bu alaşım elementi gelecek vadedilmektedir.

Bu çalışmada, endüstride çokça kullanılan ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü ticari Al-Si alaşımlarıyla bu alaşım kompozisyonlarından ötektik noktanın merkez alınarak aynı oranlarda ötektik altı ve üstü kompozisyonlara karşılık gelecek şekilde Al-Ce alaşımları hazırlanmıştır. Bu iki farklı alaşım gruplarının, mikroyapıları, mikroyapıda bulunan fazların oluşum mekanizmaları ve mikrosertlik değerleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır.

II.MATERYAL VE METOT

Al-9Si (ağırlıkça 9 % Si), Al-12,5Si (ağırlıkça 12,5 % Si) ve Al-18Si (ağırlıkça 18 % Si) alaşımları ticari Al-Si alaşımlarından, yüksek saflıkta Al (99,99 %) ve Ce (99,9 %) kullanılarak Al-13,5Ce, Al-18Ce, Al-27Ce (ağırlıkça % Ce) ikili alaşımları alümina pota içerisinde atmosfer kontrollü (sisteme kuru argon gazı verilmiştir) indüksiyon fırın (Ambrell 10 kVA, GTÜ Metal Döküm Lab.) içerisinde hazırlanmıştır. Alaşımlar hazırlanırken Al-Si ve Al-Ce ikili faz diyagramlarındaki ötektik noktalar referans olarak alınmış, her iki alaşımda ötektik öncesi ve sonrası bölümlerin yaklaşık eşit oranlarda katları alınmıştır. Al-Si ve Al-Ce alaşımlarının kimyasal kompozisyonları şematik olarak Şekil 1’de verilmiştir. Ayrıca Al-Si ve Al-Ce alaşımlarına ait faz diyagramları ekte paylaşılmıştır. Ergitme sonunda elde edilen Al-Si ve Al-Ce alaşımları 15 mm x 10 mm boyutlarında kesilerek, tüm yüzeyleri 240-2400 numara SiC zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. 1-3 µm tane boyutu aralığına sahip alümina süspansiyon yardımıyla mikroyapı incelemesi için kullanılacak yüzeyleri parlatılmıştır. Daha sonra sırasıyla su ve etanol içerisinde ultrasonik banyoda beş dakika süreyle bekletilmişlerdir. Alaşımların faz analizleri Bruker D8 X-ışınları kırınımı cihazında, Cu-K α ışını (40 kW, 40 mA) ve 10°-90° 2 θ açısı aralığının 1°/dakika hızla taranmasıyla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemesi öncesi alaşımlar, 50 ml su içerisinde 5 g KOH çözülürülerek hazırlanan solüsyona bir dakika süreyle daldırılmıştır. Alaşımların mikroyapısal incelemeleri için Nikon Eclipse LV 100 optik mikroskop cihazı ve Clemex görüntü analiz programından yararlanılmıştır. Ayrıca, alaşım içerisindeki çökelti benzeri yapıların daha belirgin olarak ortaya çıkarılması amacıyla KOH içerikli çözelti hazırlanmış olup, yüzeyleri parlatılan alaşımlar bu çözelti içerisinde 30 dakika süreyle bekletilmiştir. Sonrasında, alaşım yüzeyi bol su ve etanol ile yıkanıp, ılık hava ile kurutulmuştur. Elde edilen yüzeylerden optik mikroskop yardımıyla farklı büyüklüklerde görüntüler elde edilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri alınırken, optik mikroskoba bağlı görüntüleme sistemi veya uygulamasında bulunan farklı bölgelerin odaklanması ve farklı odaklı bölgelerinde birleştirilmesi gibi özellikler sayesinde elde edilen görüntülerin birleştirilmesi sonucunda derinlik kazanılmış çökelti veya benzeri yapıların görüntüleri elde edilmiştir. Alaşımların mikroyapı ve elementel analizlerinin yapılmasında Philips XL30 FEG SEM elektron mikroskobu ve bu cihaza bağlı EDS detektörü kullanılmıştır. Alaşımların sertlik değerlerinin belirlenmesinde Instron Testor 2100 cihazı kullanılmış, her bir alaşımdan 500 g yükte ve en az beş adet sertlik izi ölçümü alınmıştır (Yük 5 saniye süreyle tatbik edilmiştir). Alaşımların ısı analiz eğrilerinin belirlenmesinde DTA Netzsch STA 449 F3 marka cihaz kullanılmış ve alaşımlar 10 °C/dk. hızla ısıtılmışlardır.

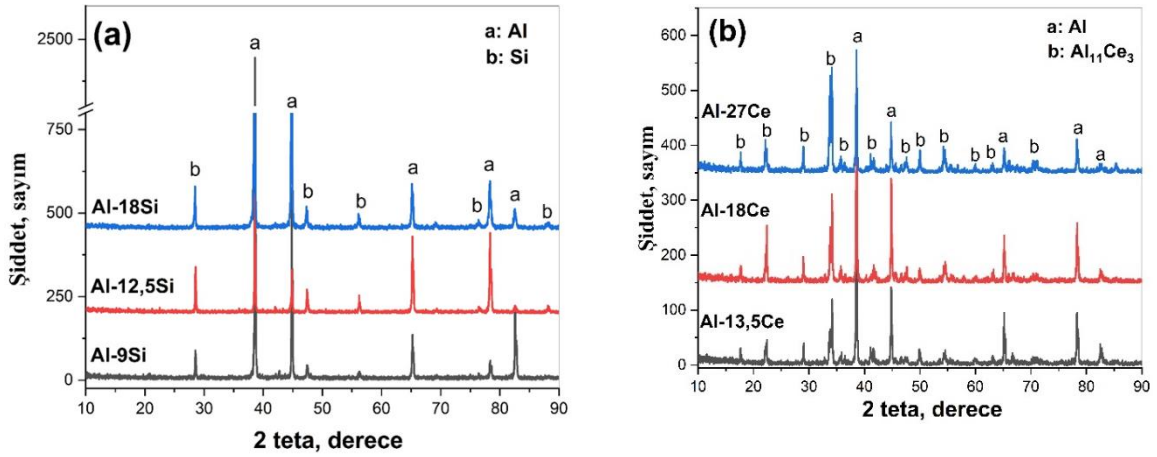


Şekil 1. Al-Si and Al-Ce alaşımlarının kimyasal kompozisyonlarının şematik olarak gösterimi

III.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. Faz Analizi

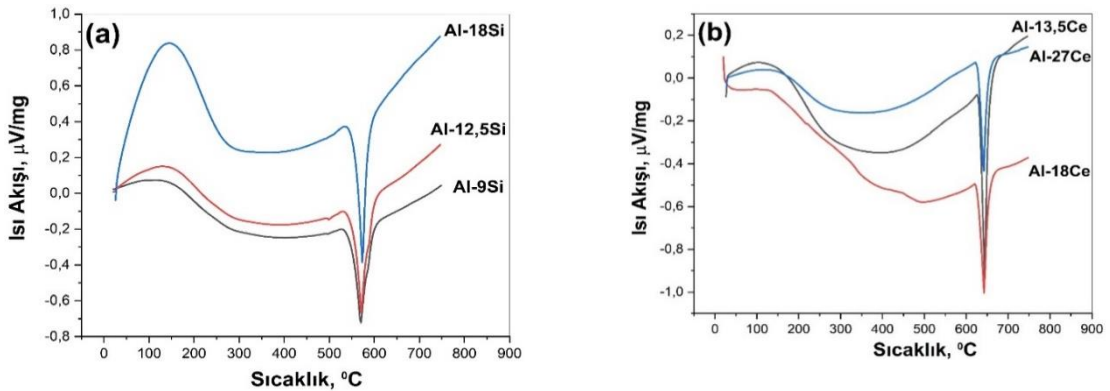
Şekil 2’de Al-Si ve Al-Ce alaşımlarından alınan XRD sonuçları verilmiştir. Al-Si alaşımlarının tümünde α -Al ve Si tespit edilmiş iken, Al-Ce alaşımlarında ise α -Al ve $Al_{11}Ce_3$ fazı tespit edilmiştir. Al-Si alaşımlarında, alaşım içerisine katkılanırılan silisyum elementi miktarındaki artışa bağlı olarak XRD spektrumları takip edildiğinde, Si fazına ait piklerin şiddetlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Benzer bir eğilim Al-Ce alaşımları içerisinde katkılanırılan seryum elementi miktarındaki artışla beraber $Al_{11}Ce_3$ fazının piklerinin şiddetlerinde artış olduğu görülmüştür. Alaşım içerisindeki element miktarındaki artış, katkılanan bu elementlerin yalın olarak veya bileşik şekline yaptıkları fazların miktarındaki artışa ve bu da XRD spektrum şiddetlerinin güçlenmesine neden olmaktadır.



Şekil 2. (a) Al-Si ve (b) Al-Ce alaşımlarına ait XRD spektrum sonuçları

B. Isıl Analiz Eğrileri

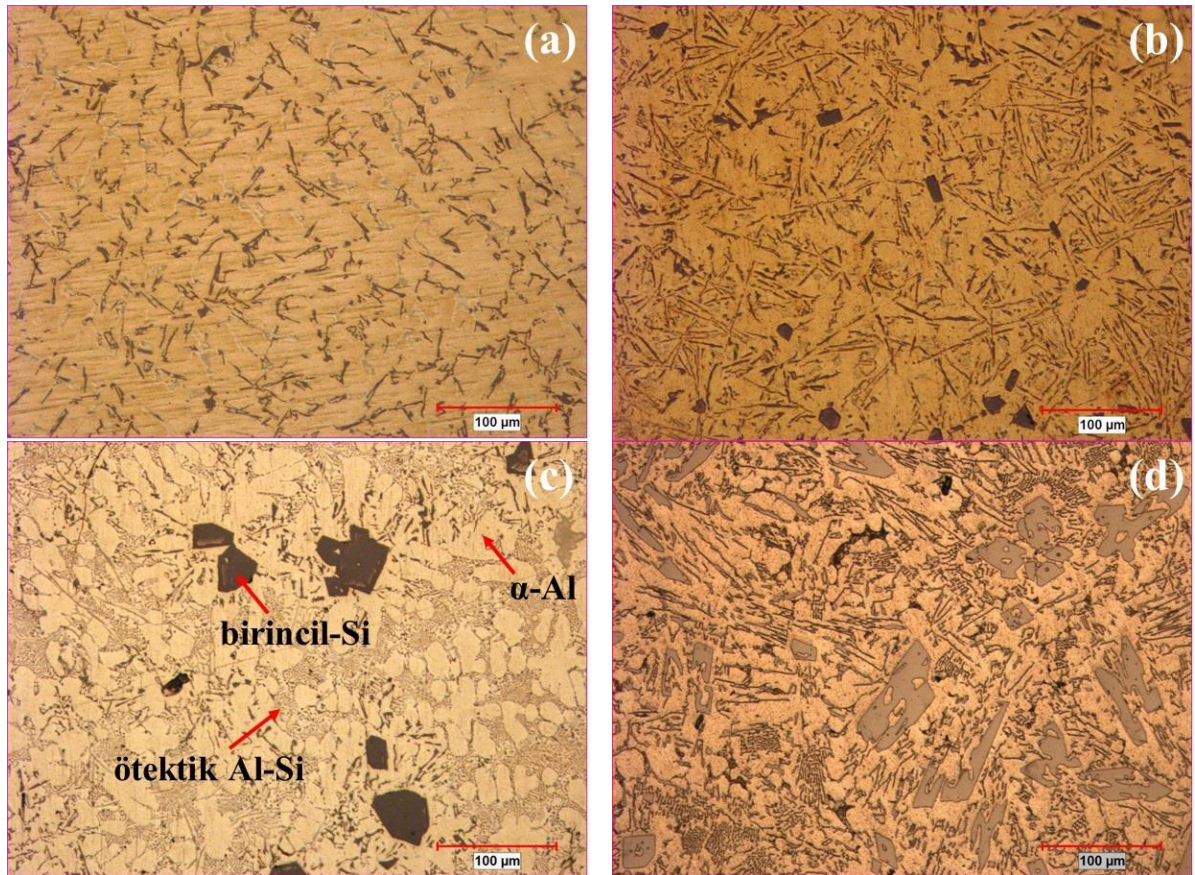
Her iki grup alaşımın ergime noktalarının belirlenmesi amacıyla DTA yardımıyla ısıl analiz eğrileri ortaya çıkarılmış olup, Şekil 3’te verilmiştir. Tüm alaşımlara ait ergime noktalarının ısıl analiz eğrileri Al-Si ve Al-Ce faz diyagramları ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu ve hazırlanan kompozisyonların belirtilen değerlerde sentezlendiği tespit edilmiştir. Al-Si alaşımlarının ötektik noktası yaklaşık olarak 573 °C olarak, Al-Ce alaşımlarının ötektik noktası ise yaklaşık olarak 642 °C olarak belirlenmiştir.

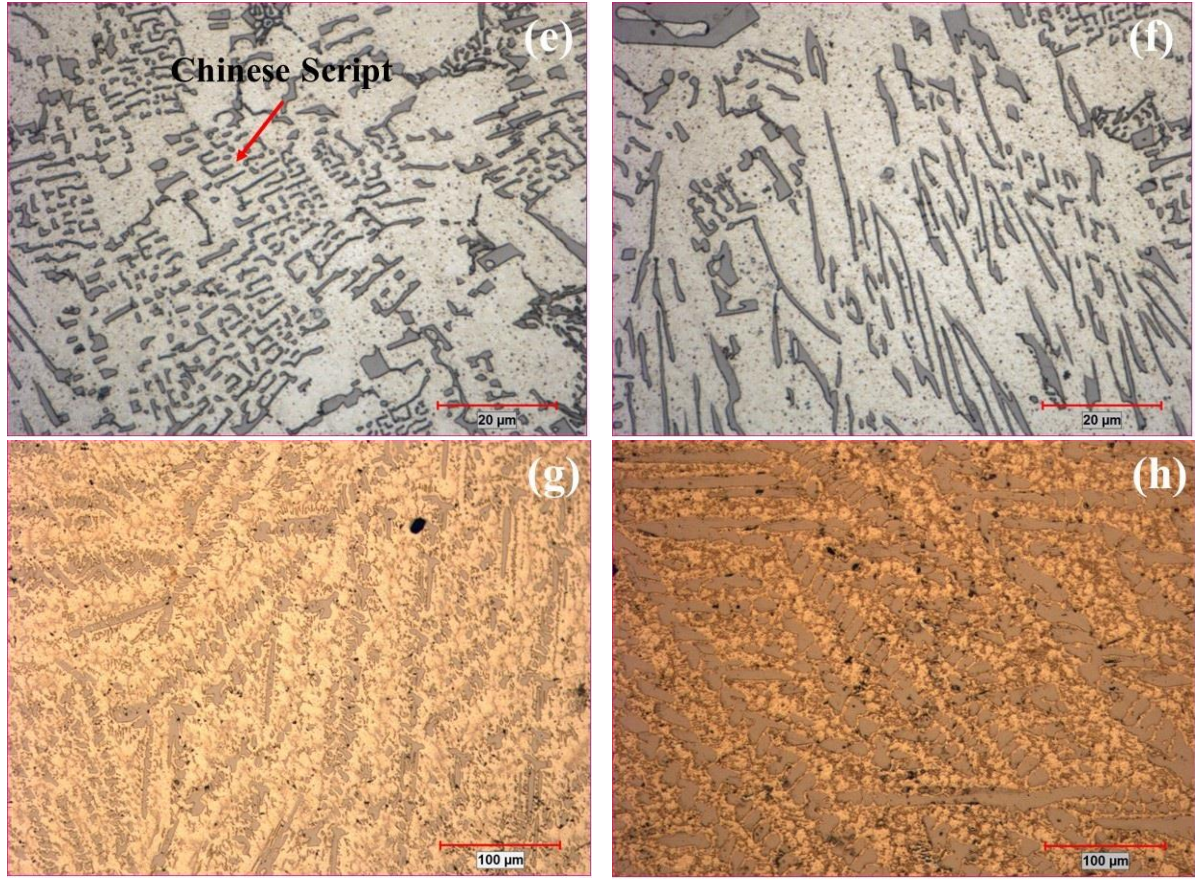


Şekil 3. (a) Al-Si ve (b) Al-Ce alaşımlarına ait DTA eğrileri

C. Mikroyapı İncelemesi

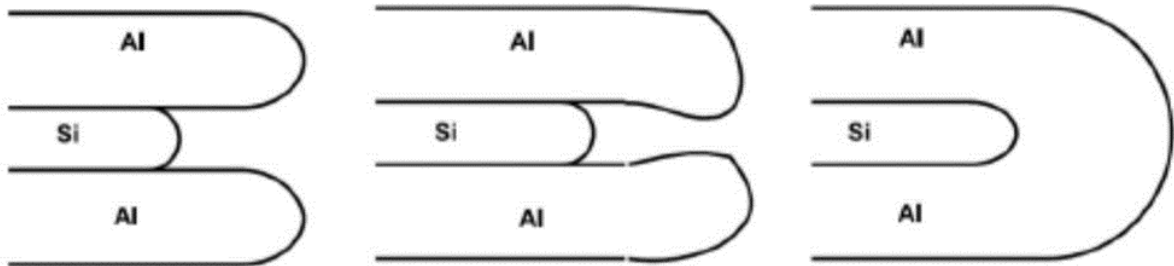
Şekil 4'te Al-Si ve Al-Ce alaşımlarına ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler optik mikroskopla alınmış olup, tüm görüntüler 200x büyütmede verilmiştir. Al-13,5Ce alaşımında bulunan farklı yapıların daha ayrıntılı olarak görüntülenmesi amacıyla Şekil 4e,f'de 1000x büyütmede mikroyapı görüntüleri de verilmiştir. Al-Si alaşımları dendritlerin birincil çökmesiyle katılaşmaktadır ve Al-Si ötektik içine gömülmüş birincil alüminyum dendrit (α -Al) yapısı Şekil 4c'de üzerinde işaretlenmiştir. Al-Si alaşımları sabit sıcaklıktan soğutulup ve sıvı halden katılaşırken, Al ve Si'nin aynı anda çökmeye başladığı Al-Si alaşımları için faz diyagramında ötektik noktada belirtilmiştir [1, 14]. Al-Si faz diyagramına göre ötektik nokta yaklaşık olarak ağırlıkça %12,5 Si içermektedir ve ergime noktası 577 °C'dir. Alüminyum içerisinde maksimum ağırlıkça %1,6 Si çözünebilirken, silisyum içerisinde alüminyum çözünürlüğü yaklaşık olarak ağırlıkça %0,5 kadardır [1, 14]. Al-Si alaşımlarının göstermiş olduğu bu özellikler alaşımların kompozit yapısı kazanmasına neden olmaktadır. Döküm alaşımında bu kompozit yapı, α -Al ve ötektik Al-Si karışımından meydana gelmekte olup, ötektik karışım miktarı alaşım içerisindeki silisyum miktarına bağlıdır. Döküm kompozit yapısında bulunan ötektik karışım Si parçacıklarından ve bu parçacıkların bulunduğu alüminyum matristen oluşmaktadır. Silisyumca zengin Al-Si alaşımlarında, birincil (primer) Si adı verilen parçacıkların çökeldiği Şekil 4b,c'de tespit edilmiş ve işaretlenmiştir. Al-Si alaşımları içerisinde bulunan Si miktarındaki artışa bağlı olarak birincil Si kristalleri kabalaşmaktadır (Şekil 4b,c). Alaşım içerisinde artan Si elementi miktarı ile bu kaba birincil Si yapıların homojen olmayan bir dağılım sergilediği de tespit edilmiştir.





Şekil 4. Alaşımlara ait optik mikroskopla alınmış mikroyapı görüntüleri; (a) Al-9Si 200x büyütme, (b) Al-12,5Si 200x büyütme, (c) Al-18Si 200x büyütme, (d) Al-13,5Ce 200x büyütme, (e) Al-13,5Ce 1000x büyütme, (f) Al-13,5Ce 1000x büyütme, (g) Al-18Ce 200x büyütme, (h) Al-27Ce 200x büyütme

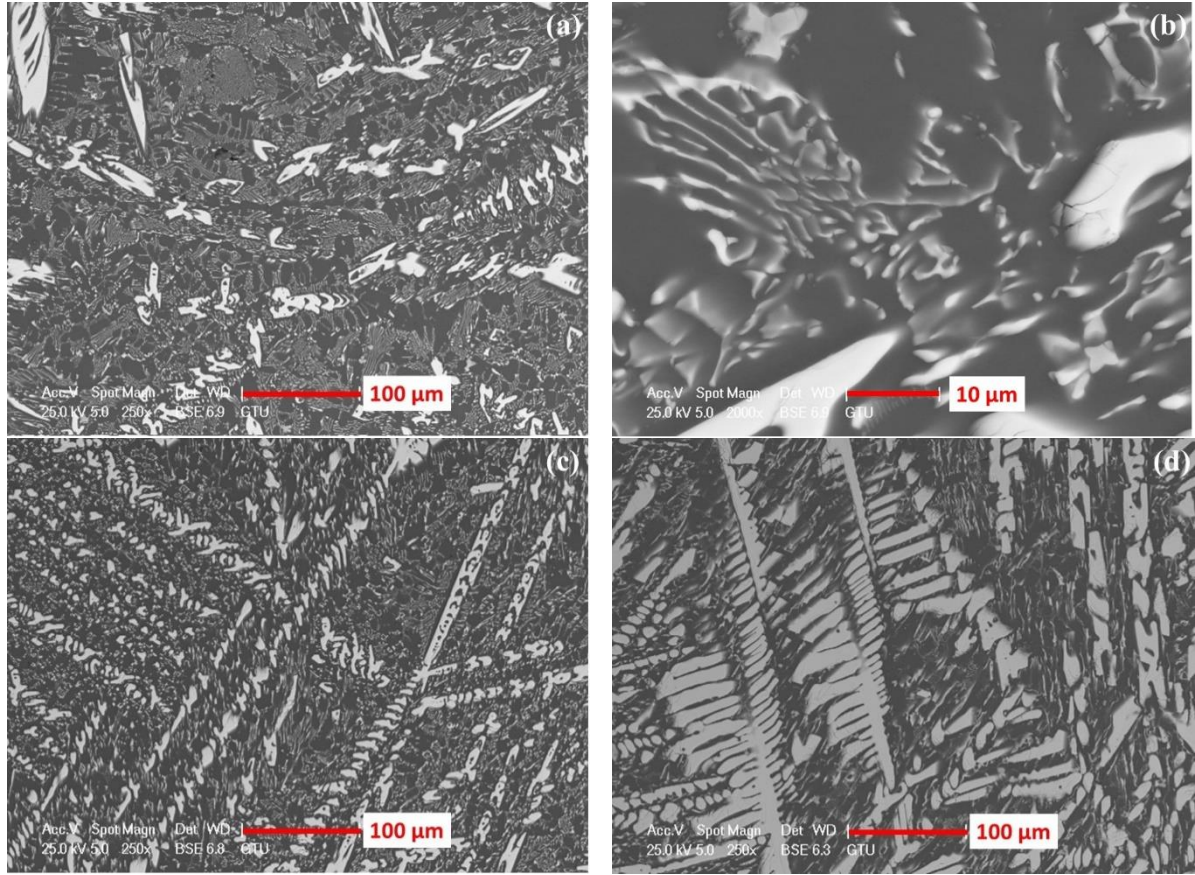
Ötektik reaksiyon sırasında meydana gelen silisyum lamellerinin oluşumu Al-Si katı arayüzeyinde yüzey enerjisi üzerine temellendirilmiştir. Katılaşma sırasında meydana gelen katılaşma arayüzeyinin ilerleme hızı, arayüzeyde sıvıdan katıya ısı akış hızı ile katılaşma sırasında dışarı salınan gizli ergime ısıları arasındaki dengeye bağlı olduğu Thall ve Chalmers tarafından ileri sürülmüştür. Al ve Si'nin saf haldeki ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 205 ve 83 W/mK ve gizli ergime ısıları ise sırasıyla 94,6 and 337 cal/g'dır. Gizli ergime ısıları arasındaki bu fark sebebiyle Al, Si'den çok daha hızlı katılaşacaktır. Şekil 5'te gösterildiği gibi ötektik alaşımın katılaşması sırasında Al, Si'ye göre daha hızlı ilerleyecektir. Si fazının daha da büyümesi, daha çok katılan Si miktarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır [14].



Şekil 5. Modifiye edilmemiş soğuk döküm Al-Si alaşımlarında ötektik katılaşma [14]

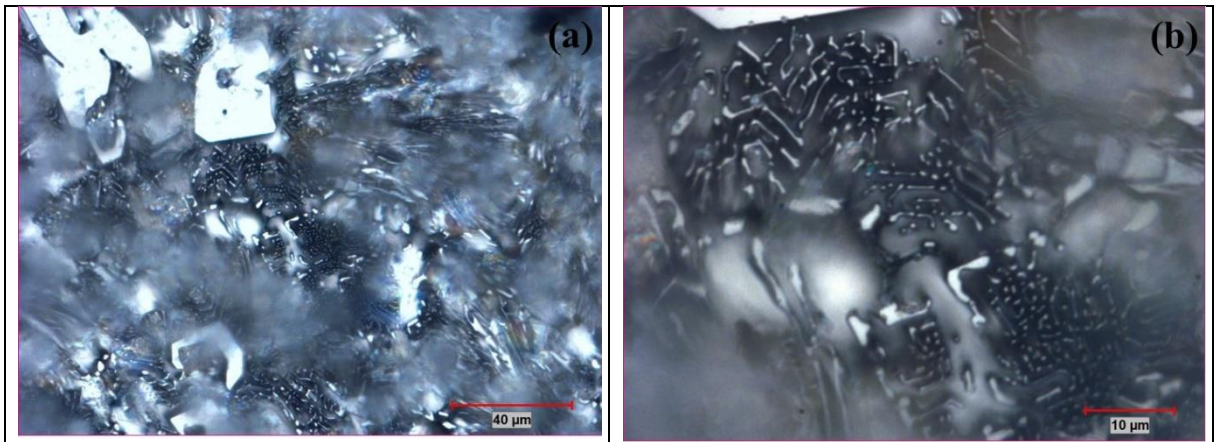
Al-Si alaşımlarında birincil silisyumun oktahedral morfoloji üzerine yakın geçmişte yapılan araştırmalarda oktahedral birincil silisyumun esasen tabakalı büyüme ile meydana geldiği tespiti yapılmıştır [15, 16]. Diğer bir araştırmada ise, yönelmiş birincil kristallerin oluşumunda baskın parametrenin arayüzey kinetiği ve madde taşınımı olduğu belirtilmiştir [15-17]. Al-Ce alaşımlarına ait özgün mikroyapı görüntüleri Şekil 4d-h’te verilmiştir. Açık renkle belirtilen kısımlar alüminyumca zengin bölgeler iken, koyu bölgeler ise $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerini temsil etmektedir. Al-13,5Ce alaşımında çok ince birbirleriyle bağlı olmayan ötektik mikroyapılar tespit edilmiş olup, ayrıca Al-13,5Ce alaşımında rastgele şekilde dağılmış ve daha detaylı tespit için yüksek büyütme fotoğrafları Şekil 4e’de verilmiştir. Bu yapılar literatürde “Chinese Script” morfolojisi olarak adlandırılmaktadır. “Chinese Script” morfolojisi Al-Si-Fe içerikli alüminyum alaşımlarında da görülmektedir [18]. Al-Si-Fe ticari alaşımlarında katılma sırasında demirce zengin intermetalik yapılar oluşmakta olup, demirce zengin bu intermetalik fazlar α -Fe ve β -Fe kristal yapısındadırlar. Katılma sırasında oluşan α -Fe ve β -Fe fazları ve sıvı alaşımın katılma hızının “Chinese Script” morfolojisinin oluşmasına neden olduğu rapor edilmiştir [19, 20]. Lakin, Al-Ce ikili alaşımlarının hazırlanmasında yüksek saflıkta Al ve Ce elementleri kullanılmış olup, alaşımlara daha sonra yapılan elementel analiz sonuçlarında da Al ve Ce dışında herhangi bir elemente rastlanmamıştır. Fakat “Chinese Script” morfolojisi Al-Ce alaşımlarında çok sık rastlanmasa da bazı bölgelerde görülmüş olup, literatürde de benzer görüntüler tespit edilmiştir [6, 9, 12, 13].

Şekil 6’da, Al-Ce alaşımlarına ait elektron mikroskopuyla alınmış mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Açık renk ile görülen bölgeler $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerine ait iken, koyu renkli bölgeler Al matris fazına aittir. $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri hem ince iğnemi hem de kaba parçacıklar şeklinde yapı içerisinde bulunmaktadır. İnce iğnemi (lameller) morfolojisinde katılma $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerinin genişlikleri yaklaşık olarak 60 nm’nin altında olup, bu yapılar Al ergime noktasına yakın sıcaklıklara kadar Al matris içerisinde çözünmeden kararlı kalabilen yapılardır. Al-Ce faz diyagramı incelendiğinde Ce’nin Al içerisindeki çözünürlüğünün yaklaşık olarak ağırlıkça <0,005 % kadar olması bu intermetaliklerin matris fazı oluşturan Al’nin ergime noktasına kadar kararlı olarak alaşım içerisinde kalmasına katkı sağlamaktadır [7, 11, 13]. Al-13,5Ce alaşımında kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri alaşım içerisinde rastgele dağılım sergilerken, alaşım içerisine katılandırılan Ce miktarındaki artışı bağlı olarak kaba çökelti şeklinde oluşan $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerinin miktarında ve boyutlarında göreceli olarak bir artış tespit edilmiştir (Şekil 6). Özellikle en yüksek Ce miktarına sahip Al-27Ce alaşımında, kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri dentritik yapıda katılmış olup, rastgele olarak değil de, belirli yönlerde katıldıkları ve bununda döküm esnasında sıvı fazın soğutulma yönünden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri (daha sonra bu yapıya birincil yapılar diyeceğiz), katılandırılan seryum miktarı artışı veya ergimiş alaşımın soğutma hızının yavaşlığı ile ilişkili olup, tüm alaşımlar benzer şartlarda sentezlendiği için bu kaba parçacıklar alaşım elementi miktarıyla ilişkilendirilebilir. Bu kaba parçacıkların büyüme sebeplerinden biri de, Al-Si alaşımlarında gözlemlenen iki faz arasındaki ısı iletkenlik katsayısı farklılığına benzer şekilde olup, Al-Ce alaşımlarında tespit edilen α -Al ve $Al_{11}Ce_3$ fazları arasındaki ısı iletkenlik katsayılarının farklı oluşudur. $Al_{11}Ce_3$ fazının ısı iletkenlik katsayısı değerinin α -Al’nin değerinden küçük olması, düşük katılma hızına sahip olmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, alaşım içerisinde yüksek Ce konsantrasyonu durumunda, ötektik öncesi aşama bastırılmamakta ve kaba birincil $Al_{11}Ce_3$ parçacıklarının büyümesi daha kolay gerçekleşebilmektedir. Özetle Al-Ce alaşımı içerisine katılandırılan Ce miktarı artışına bağlı olarak ötektik $Al_{11}Ce_3$ fazı azalırken, kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik yapıların miktarı ve iriliği artmaktadır.



Şekil 6. Al-Ce alaşımlarına ait SEM görüntüleri, (a) Al-13,5Ce 250x büyütme, (b) Al-13,5Ce 2000x büyütme, (c) Al-18Ce 250x büyütme, (d) Al-27Ce 250x büyütme

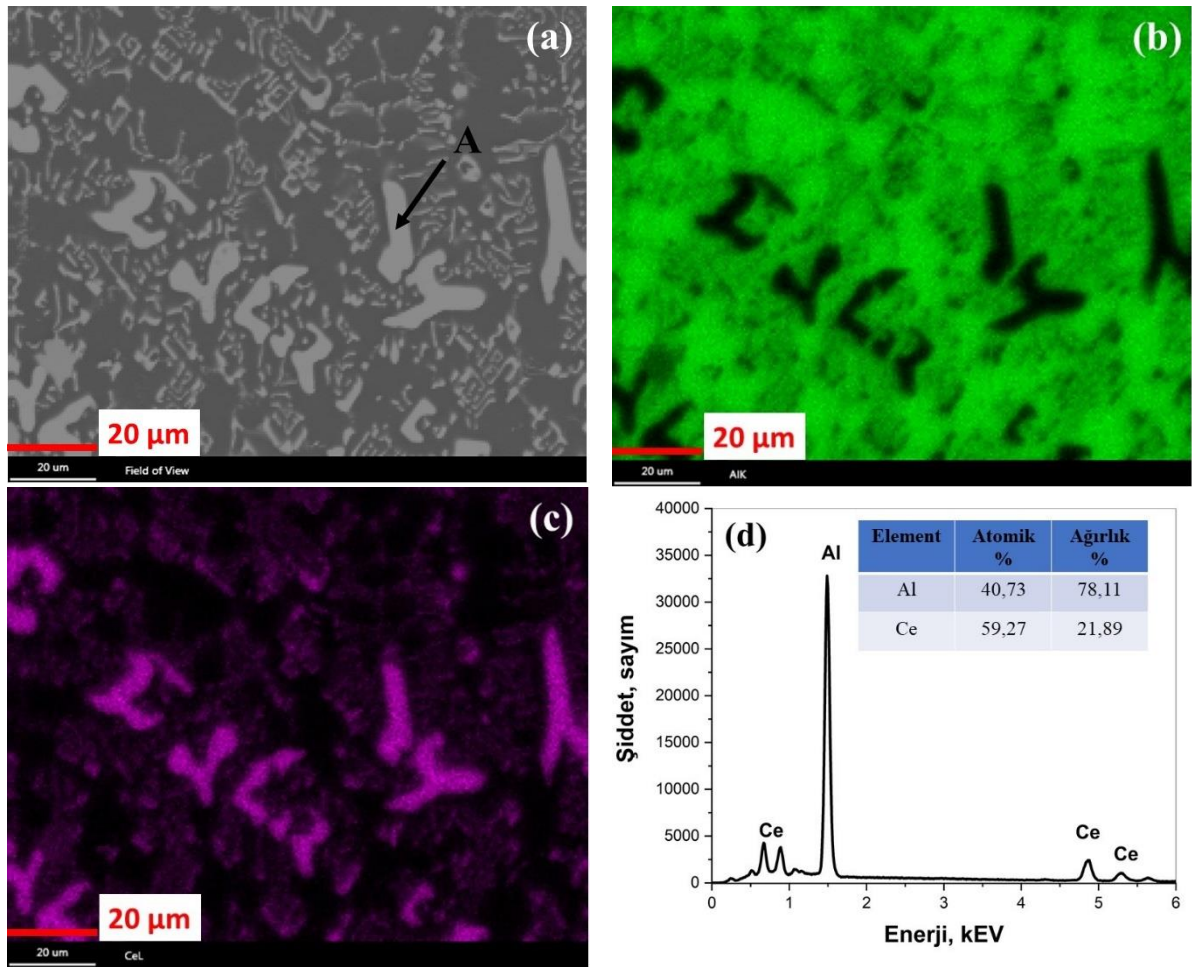
Şekil 7’de, Al-13,5Ce alaışının matris fazının çözülerek elde edilmiş iki farklı büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir. İnce $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri, α -Al matris fazı içerisine dağılımları şekilde görülmekte olup, ince lameler yapılarının matris fazın içerisine doğru büyüdüğü ve matris faza gömüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 7. Al-13,5Ce alaışımına ait optik mikroskop görüntüleri, (a) 500x büyütme, (b) 1500x büyütme

D. Elementel Analiz

Al-13,5Ce alaışımının mikroyapı görüntüsü, bu görüntüden alınan noktasal elementel ve haritalamalı analiz sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Mikroyapı görüntüsünde bulunan ince iğnemsî ve kaba yapıların $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerini temsil ederken, daha koyu bölgeler α -Al fazını temsil etmektedir. Haritalanmış elementel analiz sonuçları da bu tespiti doğrulamakta olup, açık renkli bölgelerin seryumca zengin olduğu, diğer koyu bölgelerin ise alüminyumca zengin olduğu belirlenmiştir (Şekil 8b,c). Şekil 8a'da mikroyapı görüntüsü üzerinde işaretlenen birincil $Al_{11}Ce_3$ intermetalik çökeltilerinden bir tanesi "A" ile işaretlenmiş olup, bu bölgeden alınan noktasal elementel analiz spektrumu ve element dağılım miktarı Şekil 8d'de verilmiştir. "A" ile işaretli bölgede Al ve Ce elementleri tespit edilmiş, $Al_{11}Ce_3$ intermetalığının ağırlık-atomik yüzde elementel değerleriyle EDS sonucundan elde edilen elementel dağılım değerlerinin hemen hemen birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Al-13,5Ce alaışımına ait SEM görüntüsü ile SEM-EDS elementel haritalama analizi, (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Ce elementel haritalaması ve (d) Şekil 8a'da "A" işaretli bölgeden alınan noktasal EDS spektrumu sonucu

E. Sertlik

Al-Si ve Al-Ce alaışımından alınan mikrosertlik değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Al-Si alaışımını grubunda, alaşım içerisine katkılanırılan silisyum miktarındaki artışa bağılı olarak sertlik değerinde fark edilebilir bir artış tespit edilmiştir. Al-Ce alaşım gruplarına ait sertlik değeri incelendiğinde ise alaşım içerisine katkılanırılan Ce miktarındaki artışa bağılı olarak sertlik değerinin arttığı ve artış değerinin yüzde olarak Al-Si alaışımında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Al-Ce alaışımından en yüksek sertlik değerine sahip olan Al-

27Ce alaşımlarının sertlik değeri, Al-Si alaşımlarındaki en düşük sertlik değerinden daha düşüktür. Al-Si alaşımlarına katkılan silisyum miktarı artışı ile birincil Si parçacıklarının miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerinin daha da yükselmesine katkı sağlanmıştır. Benzer bir eğilimi Al-Ce alaşım grubunda da görmek mümkün olup, alaşım içerisine katkılan seryum miktarı artışı, kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik yapıların miktarını ve büyüklüğünü arttırmış bu da alaşımın sertlik değerinde yükselmeye katkı sağlamıştır.

Tablo 1. Al-Si ve Al-Ce alaşımlarının sertlik değerleri

Alaşım Grubu	Sertlik Değeri, HV
Al-9Si	228 ± 8
Al-12,5Si	256 ± 5
Al-18Si	263 ± 7
Al-13,5Ce	131 ± 10
Al-18Ce	143 ± 10
Al-27Ce	218 ± 3

IV. GENEL SONUÇLAR

Al-Si ve Al-Ce alaşımları farklı kompozisyonlarda hazırlanmış olup, döküm mikroyapısı, faz analizi, elementel dağılım, ısıl özellik ve mikrosertlik açısından incelenmiştir. Genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

•Al-Si alaşımlarında, α -Al, ötektik Al-Si ve birincil Si yapıları tespit edilmiştir. Al-Ce alaşımlarında ise, α -Al, ince $Al_{11}Ce_3$ intermetalik lamellerinin de olduğu ötektik Al/ $Al_{11}Ce_3$ ve kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik yapıları tespit edilmiştir. Bu yapılar ek olarak Al-13,5Ce alaşımında “Chinese Script” morfolojisinde yapılar raporlanmıştır.

•Al-Si alaşımlarına katkılan silisyum miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerinde artış olduğu, benzer bir yaklaşımla da Al-Ce alaşımına katkılan seryum miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinde artış tespit edilmiştir. Al-Si alaşımlarının sertlik değerlerinin, Al-Ce alaşımlarının sertlik değerlerine göre yüksek olduğu belirlenmiştir.

•Al-Si alaşımlarının tümünde α -Al ve Si fazları, Al-Ce alaşımlarında ise α -Al ve $Al_{11}Ce_3$ fazları tespit edilmiştir. Al-Si alaşımına katkılan silisyum miktarındaki artışa bağlı olarak Si fazına ait piklerinin şiddetlerinde artış, Al-Ce alaşımlarına katkılan seryum miktarındaki artışa bağlı olarak da $Al_{11}Ce_3$ fazının piklerinin şiddetlerinde artış olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

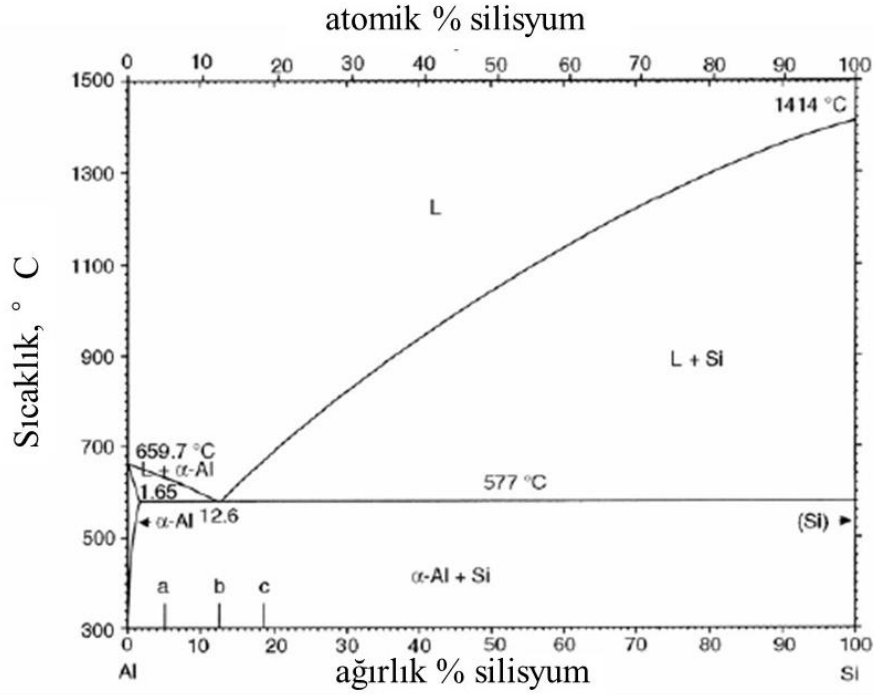
SEM, EDS ve XRD çalışmaları sırasında analitik ölçümlerin gerçekleştirilmesinde teknik yardımları bulunan teknisyenler Ahmet Nazım ve Adem Şen'e teşekkür ederim. Ayrıca Prof. Mehmet Tarakçı ve Prof. Yücel Gencer'e Metal Döküm Laboratuvarı'nın imkanlarını kullanmama olanak tanıdıkları için teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

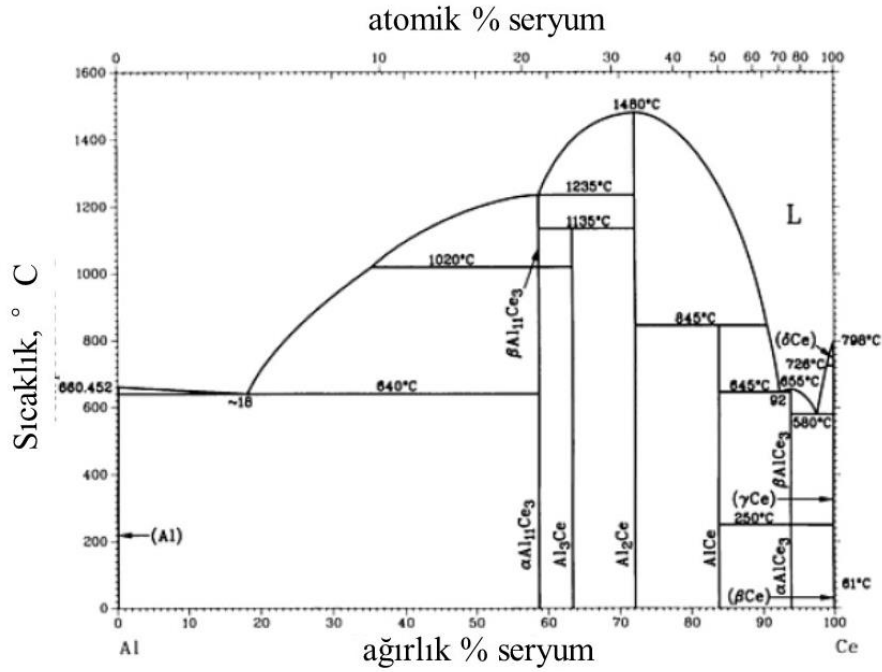
- [1] Davis,J.R.(1993). Aluminum and Aluminum Alloys.
- [2] Miller,W.S., Zhuang,L., Bottema,J., Wittebrood,A., De Smet,P., Haszler,A., &Vieregge A. (2000)Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, Mat Sci Eng a-Struct, 280, 37-49.
- [3] Grzesleski,J.E.,&Closset,B.M. (1990). The treatment of liquid aluminum-silicon alloys, American Foundrymen's Society.

- [4] Stadler,F., Antrekowitsch,H., Fragner,W., Kaufmann,H., Pinatel,E.R., &Uggowitzer,P.J.(2013). The effect of main alloying elements on the physical properties of Al-Si foundry alloys, *Mat Sci Eng a-Struct*, 560, 481-491.
- [5] Zamani,M. (2015).Al-Si Cast Alloys Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature, in: School of Engineering Jönköping University.
- [6] Weiss,D. (2019). Improved High-Temperature Aluminum Alloys Containing Cerium, *J Mater Eng Perform*, 28, 1903–1908.
- [7] Sims,Z.C., Weiss,D., McCall,S.K., McGuire,M.A., Ott,R.T., Geer,T., Rios,O.,&Turchi,P.A.E. (2016). Cerium-Based, Intermetallic-Strengthened Aluminum Casting Alloy: High-Volume Co-product Development, *Jom-Us*, 68, 1940-1947.
- [8] Wang,L., Makhlof,M.,&Apelian D. (1995). Aluminium die casting alloys: Alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships, *Int Mater Rev*, 40, 221-238.
- [9] Liu,Y., Michi,R.A. &Dunand,D.C. (2019). Cast near-eutectic Al-12.5 wt.% Ce alloy with high coarsening and creep resistance, *Mat Sci Eng a-Struct*, 767, 138440.
- [10] Knipling,K.E., Siedman,D.N.,&Dunand,D.C.(2011). Ambient- and high-temperature mechanical properties of isochronally aged Al–0.06Sc, Al–0.06Zr and Al–0.06Sc–0.06Zr (at.%) alloys, *Acta Mater*, 59, 943-954.
- [11] Sun,Y., Hebert,R.J., Fennessy,C., Tulyani,S.,&Aindow,M. (2019). Eutectic microstructures in dilute Al-Ce and Al-Co alloys, *Mater Charact*, 154, 269-276.
- [12] Sims,Z.C., Rios,O., Weiss,D., Turchi,P.A.E., Perron,A., Lee,J.R., &Li,T.T. (2017). High Performance Aluminum-Cerium Alloys for High-Temperature Applications, *Materials Horizons*, 4, 1070-1078.
- [13] Weiss,D. (2017). Castability and Characteristics of High Cerium Aluminum Alloys, in: T.R. Vijayaram (Ed.) *Advanced Casting Technologies*, Intechopen, pp. 47-56.
- [14] Makhlof,M., &Guthy,H.V. (2001). The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography, *Journal of Light Metals*, 1, 199-218.
- [15] Xu,C.L., Wang,H.Y., Liu,C., &Jiang,Q.C. (2006). Growth of octahedral primary silicon in cast hypereutectic Al–Si alloys, *Journal of Crystal Growth*, 291, 540-547.
- [16] Wang,R.Y., Lu,W.H., &Hogan,L.M. (1997). Faceted growth of silicon crystals in Al-Si alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A* 28, 1233-1243.
- [17] West,R., &Fredriksson,H. (1985). On the mechanism of faceted growth *J Mater Sci Technol*, 20, 1061-1068.
- [18] Taylor,J.A. (2012). Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys, *Procedia Materials Science*, 1, 19-33.
- [19] Irizalp,S.G., &Saklakoglu,N. (2014). Effect of Fe-rich intermetallics on the microstructure and mechanical properties of thixoformed A380 aluminum alloy, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 17, 58-62.
- [20] Ferdian,D., Josse,C., Nguyen,P., Gey,N., Thebault,Y., Malard,B., Lacaze,J., &Salvo,L. (2015). Chinese Script vs Plate-Like Precipitation of Beta-Al₉Fe₂Si₂ Phase in an Al-6.5Si-1Fe Alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46, 2814-2818.

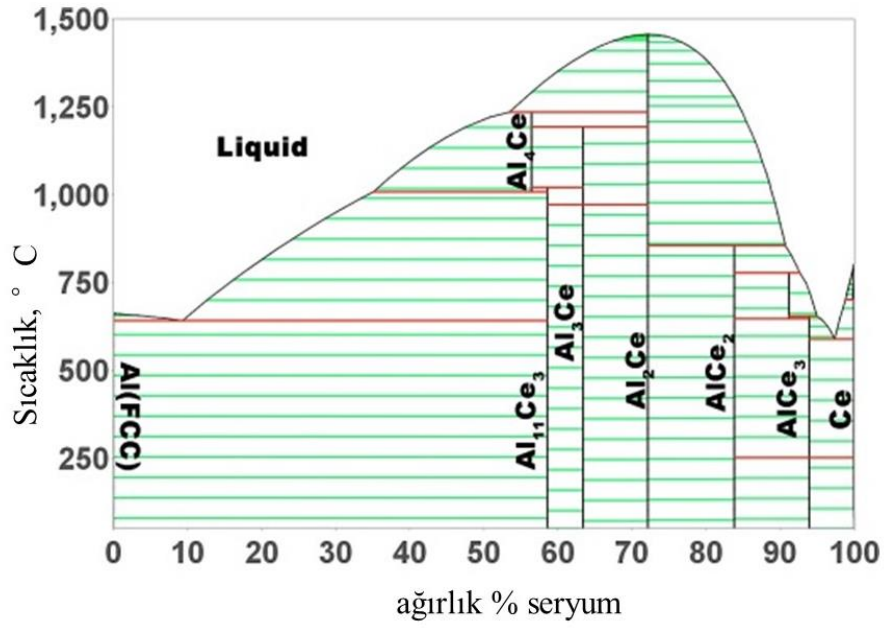
EKLER



Şekil Ek-1. Al-Si faz diyagramı. Murray, J.L. and McAlister, A.J. (1984). ASM Metals Handbook Volume 03-Alloy Phase Diagrams.



Şekil Ek-2. Al-Ce faz diyagramı. Okamoto, H. (2011) Al-Ce (Aluminum-Cerium). J Phase Equilib Diffus 32, 4, 392-393.



Şekil Ek-3. Al-Ce faz diyagramı. Plotkowski, A., Rios, O., Sridharan, N., Sims, Z., Unocic, K., Ott, R.T., Dehoff, R.R., Babu, S.S. (2017). Evaluation of an Al-Ce alloy for laser additive manufacturing. *Acta Materialia* 126, 507-519.

Araştırma Makalesi – Research Article

Cr₂O₃ Nanoyapılarının Elektrokimyasal Sentezi ve Karakterizasyonu

Ahmet Recep Korkmaz¹, Emir Çepni², Hülya Öztürk Doğan^{3*}

Geliş / Received: 20/04/2020

Revize / Revised: 04/10/2020

Kabul / Accepted: 15/10/2020

ÖZ

Bu çalışmada krom(III) oksit (Cr₂O₃) nanoyapıları flor katkı kalay oksit (FTO) kaplı cam elektrot yüzeyinde elektrokimyasal teknik kullanılarak sentezlenmiştir. Elektrolit çözeltisi olarak CrCl₃ içeren ortamda öncelikle krom oksihidroksit türleri oluşturulmuş ve sonrasında ısı işlem uygulanarak oksit formuna dönüşüm sağlanmıştır. Elektrokimyasal sentez üzerine indirgenme potansiyeli ve depozisyon süresinin etkisi incelenmiştir. Elektrokimyasal olarak biriktirilen Cr₂O₃ nanoyapılarının karakterizasyonu XRD, SEM ve EDS teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. -1,4 V sabit potansiyelde hazırlanan Cr₂O₃ nanoyapılarının XRD spektrumunda Cr₂O₃'in (110) düzlemine ait kırınım piki elde edilmiştir. EDS spektrumu ise elementel olarak oldukça saf Cr₂O₃ nanoyapılarının sentezlendiğini desteklemiştir.

Anahtar Kelimeler- *Elektrokimyasal Biriktirm, Flor Katkılı Kalay Oksit, Krom Oksit, Nanoyapı.*

¹İletişim: ahmetkorkmaz381@gmail.com (<http://orcid.org/0000-0003-3583-514X>)

Nanobilim ve Nanomühendislik Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

²İletişim: emircepni@windowslive.com (<https://orcid.org/0000-0001-8738-1157>)

Nanobilim ve Nanomühendislik Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

^{3*}Sorumlu yazar iletişim: hdogan@atauni.edu.tr (<http://orcid.org/0000-0002-4072-7744>)

Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojisi Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Electrochemical Synthesis and Characterization of Cr₂O₃ Nanostructures

ABSTRACT

In this study, chromium (III) oxide (Cr₂O₃) nanostructures were synthesized using electrochemical technique on the surface of the fluorine-doped tin oxide (FTO) coated glass electrode. Firstly, chromium oxyhydroxide species were created in the aqueous electrolyte solution containing CrCl₃, and then thermal annealing was applied to convert to oxide form. The effect of reduction potential and deposition time on electrochemical synthesis was investigated. The characterization of electrochemically deposited Cr₂O₃ nanostructures was carried out using XRD, SEM and EDS techniques. The diffraction peak of the Cr₂O₃ (110) plane was obtained in the XRD spectrum of Cr₂O₃ nanostructures prepared at -1,4 V constant potential. The EDS spectrum supported that elementally highly pure Cr₂O₃ nanostructures were synthesized.

Keywords- *Electrochemical Deposition, F-Doped Tin Oxide, Chromium Oxide, Nanostructure*

I. GİRİŞ

Endüstriyel ihtiyaçların artmasıyla birlikte, nanoboyutlu metal oksitler üzerine yapılan çalışmalar gittikçe daha ilgi çeken bir alan oluşturmuştur [1-4]. Yığın malzemelere kıyasla nanoboyutlu materyallerin maliyetlerinin düşük olması ve yüksek yüzey alanı/hacim oranlarına sahip olmaları bu malzemelere olan ilgiyi arttırmıştır. Düşük maliyet ve birkaç oksidasyon formu (+2, +3, +6) ile krom oksit, elektrokimyasal uygulamalar için ideal bir elektrot malzemesi olarak kabul edilir. Krom (III) oksit (Cr_2O_3) önemli bir geçiş metal oksiti olup, çimento endüstrisi [5] ve katalizör uygulamaları gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılır. Kromun tüm oksitleri arasında Cr_2O_3 formu en kararlı olanıdır ve geniş bir aralıktaki sıcaklık, basınç değişimlerine karşı kararlı halini korur [6-8]. Nanoboyutlu Cr_2O_3 'ün endüstriyel değeri dünyada giderek daha fazla ilgi görmekte ve daha fazla uygulama alanında kullanımı incelenmektedir [9,10]. Örneğin, elektrik, manyetik malzeme ve hidrojen depolama alanında kullanılabilir. Cr_2O_3 ayrıca refrakter malzeme olarak da kullanılabilir [11]. Cr_2O_3 'ün çeşitli maddelerle kompoziti oluşturularak aşınma ve korozyon direnci ile mekanik özellikleri geliştirilebilir [12-15]. Cr_2O_3 'ün katalizör olarak kullanıldığı uygulamalar da literatürde bulunmaktadır [16-18]. Petrokimya endüstrisinde hidrojenasyon organik reaksiyonları ve organik maddenin ayrışması gibi uygulamalarda katalizör olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aynı zamanda farklı katalizörler ya da malzemeler ile katkılama yoluyla elde edilen bileşik katalizörlerde dikkate değer bir performans artışına olanak sağlayabilmektedir [19-24]. Kompozit Cr_2O_3 katalizörleri gaz dönüşümü, gaz üretimi ve malzeme dönüşümünde kullanılmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, Cr_2O_3 hidrojen depolama malzemeleri [25,26], gaz sensörleri [27-30], manyetik uygulamalar [31-33], lityum malzeme [34-37] ve güneş enerjisi uygulaması [38,39] gibi farklı alanlarda araştırılmıştır.

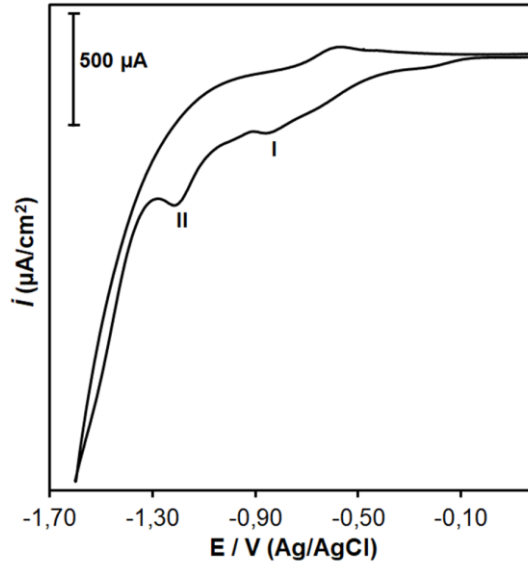
Nanoboyutlu Cr_2O_3 çeşitli yöntemlerle sentezlenebilir. Genel olarak, bu sentez yöntemleri katı faz yöntemi, sıvı faz yöntemi ve buhar fazı yöntemi olmak üzere üç ana kategoriye ayrılabilir. Cr_2O_3 katı faz yöntemi olan termal ayrışma [40,41] yöntemi; sıvı faz yöntemleri olan mikroemülsiyon yöntemi [10], sol-jel yöntemi [42,43], çökeltme yöntemi [44-46], hidrotermal yöntemi [47,48], solvotermal yöntemi [49] ve mikrodalga yöntemi [50]; gaz faz yöntemleri olan kimyasal buhar yoğunlaşma fazı yöntemi [51], lazer buharı biriktirme yöntemi [52] ve metal organik kimyasal buharı biriktirme yöntemi [53] kullanılarak sentezlenmiştir. Katı faz ve buhar fazı yöntemleri oldukça yüksek maliyetlidirler ve büyük ölçekli sentezde yüksek saflık elde etmek oldukça zordur. Sıvı faz yöntemlerinde boyutu kolaylıkla kontrol edilebilir nanoparçacıkların elde edilmesi nispeten kolaydır. Elektrokimyasal teknik ise sıvı faz uygulamaları içerisinde ucuz, kolay, basit ve oda koşullarında uygulanabilir olması nedeniyle avantajlıdır. Özellikle substrat yüzeyinde doğrudan malzeme oluşumuna imkan tanınması bu yöntemi pratik kılmakla birlikte; ağır kimyasallar ve yüksek sıcaklık/basınç ortamına ihtiyaç duyulmaması da ticarileşme anlamında maliyeti düşürmektedir. Bu avantajlarına rağmen literatürde Cr_2O_3 nanoyapılarının doğrudan elektrot yüzeyinde elektrokimyasal sentezine yönelik herhangi bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmanın temel amacı; güneş pillerinde oldukça fazla uygulama alanına sahip görünür bölge duyarlı ve optiksel olarak geçirgen materyalin elektrokimyasal biriktirme ile eldesidir. Bu sayede gelecekte modifiye elektrotların hazırlanmasında alt yapı oluşturacak Cr_2O_3 nanoyapılarının sentezlenmesi mümkün olacaktır.

II. MATERYAL VE METOT

Cr_2O_3 nanoyapılarının elektrokimyasal sentezi için 3 elektrotlu hücre sistemi seçilmiştir. Bu hücre sistemi için çalışma elektrodu flor katkılı kalay oksit (FTO), karşıt elektrodu Pt tel (yaklaşık %99,95 saflıkta, 0,5 mm çapında ve 5 cm uzunluğunda) ve referans elektrodu Ag/AgCl kullanılmıştır. Elektrokimyasal depozisyonların öncesinde FTO elektrodun temizliği yapılmıştır. Bunun için FTO elektrot sırası ile etanol ve saf su içerisinde 15 dakika ultrasonik banyoda bekletilmiştir. Elektrolit çözeltisi ise 5 mM CrCl_3 ve 50 mM NH_4Cl içeren sulu çözeltidir. Elektrokimyasal depozisyon öncesinde ve depozisyon esnasında elektrolit çözeltisinden O_2 gazı geçirilmiş ve her deney öncesi dönüşümlü voltamogram (CV) alınmıştır. CV ölçümleri oda sıcaklığında +0,2 V ile -1,7 V potansiyel aralığında 100 mV/s tarama hızında Gamry Reference 600+ potansiyostat cihazı kullanılarak kaydedilmiştir. FTO yüzeyinde sabit potansiyel altında elektrokimyasal depozit edilen krom oksihidroksit türleri O_2 gazı geçirilen sistemden 400 °C ve 500 °C'de ısı işleme tabi tutulmuş ve Cr_2O_3 yapısına dönüşümü sağlanmıştır. Sentezlenen nanoyapıların yapısal karakterizasyonu X-ışınları kırınım spektroskopisi (XRD) ve Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile gerçekleştirilmiştir. Morfolojik karakterizasyon için ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

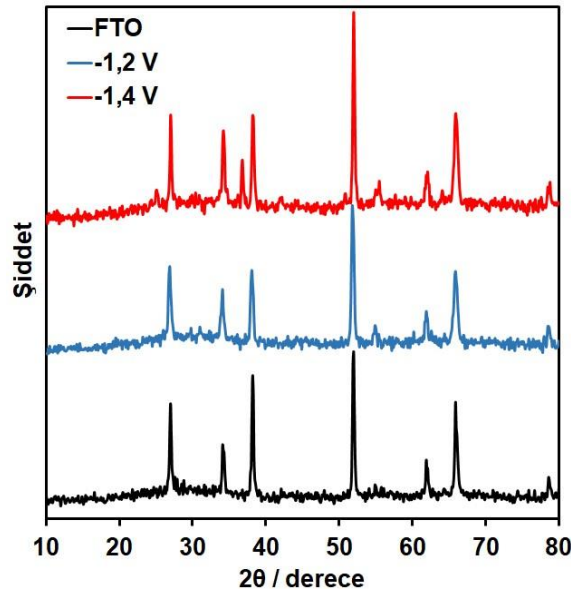
Elektrokimyasal sentez için öncelikle 5 mM CrCl₃ ve 50 mM NH₄Cl içeren çözeltiden O₂ gazı geçirilmiş ve bu elektrolit ortamında FTO elektrodun dönüşümlü voltamogramı alınmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. 5 mM CrCl₃ ve 50 mM NH₄Cl içeren çözeltide FTO elektrodun dönüşümlü voltamogramı

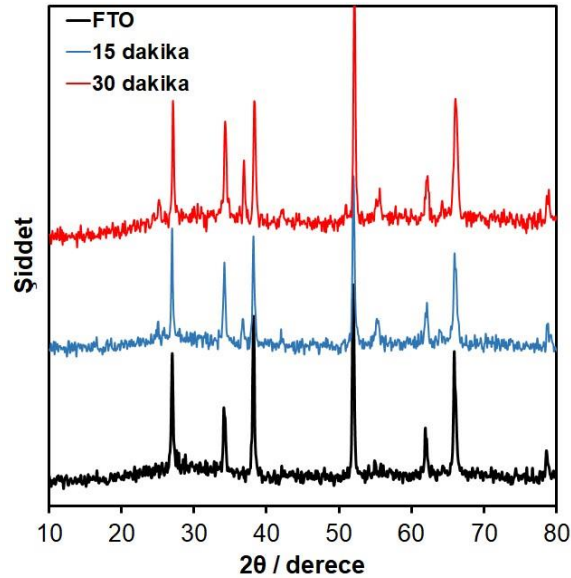
Şekil 1’de verilen voltamogram incelendiğinde; indirgenme yönünde iki indirgenme piki görülmektedir. Literatürde I.pikin Cr⁺³ türlerinin Cr⁺²’ye indirgenmesine karşılık geldiği, II.pikin ise Cr⁺² türlerinin Cr⁰’a indirgenmesine ait olduğu belirtilmektedir [54]. Çözelti içerisinde O₂ bulunması durumunda; elektrot yüzeyinde indirgenmiş Cr türleri O₂ ve suyun hidroksiti ile birleşir; böylece krom oksihidroksit türlerini oluşturur. Bu türlere ısı işlem uygulandığında kolaylıkla hidroksit formundan oksit formuna geçiş olmaktadır. Literatürde metal oksitlerin bu şekilde elde edilmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur [55].

Cr₂O₃ nanoyapılarının elektrokimyasal sentezi için depozisyon potansiyeli ve depozisyon süresi gibi parametrelerin oluşan nanoyapılar üzerine etkisi XRD spektrumları alınarak incelenmiştir. Depozisyon potansiyeli olarak Şekil 1’de alınan voltamograma göre -1,2 ve -1,4 V değerleri seçilmiş ve bu potansiyellerde 30 dakika süre ile biriktirilmiş numuneler 500 °C’de 1 saat süre ile ısı işleme tabi tutulmuştur. Bu numunelere ve karşılaştırma amacıyla FTO elektroduna ait XRD spektrumları Şekil 2’de gösterilmiştir. Substrat olarak kullanılan FTO elektroduna ait kırınım pikleri 27,0; 34,1; 38,2; 52,8; 61,9 ve 65,9°’lerde gözlenmiştir. -1,2 V’ta depozit edilen numune için alınan XRD spektrumunda FTO pikleri dışında Cr₂O₃’e ait kırınım piklerinin elde edilememesi depozisyon potansiyelinin Cr₂O₃ yapısının oluşması için yeterli olmadığına işaret eder. -1,4 V’ta sentezlenen numunede ise Cr₂O₃’in (110) düzlemine ait 2θ=36,8°’deki piki elde edilmiştir. Bu kırınım piki JCPDS-38-1479 kart numarası ile uyumludur. Ek olarak metalik Cr (2θ=44,4°) veya krom oksihidroksit (2θ=20°) yapılarına ait herhangi bir kırınım piki gözlenmemiştir. Bu durum elektrot yüzeyine depozit edilen türlerin ısı işlem ile tamamen Cr₂O₃ formuna dönüştüğünü ifade eder.



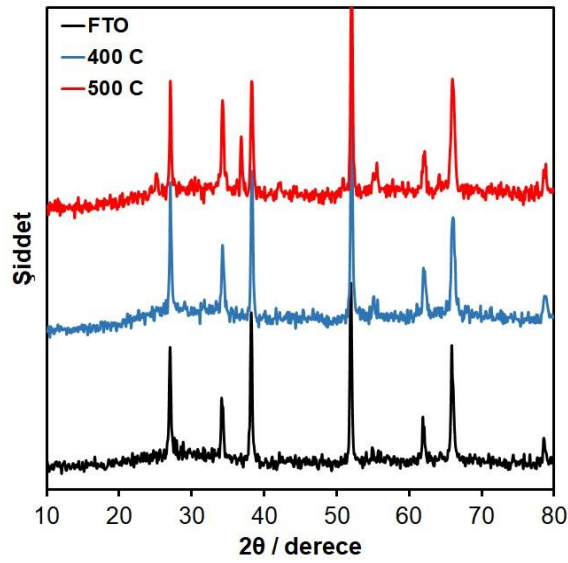
Şekil 2. Farklı depozisyon potansiyellerinde sentezlenen Cr_2O_3 nanoyapılarının XRD spektrumları

-1,4 V sabit potansiyelde farklı depozisyon sürelerinde (15 ve 30 dakika) numuneler hazırlanmış ve XRD spektrumları Şekil 3'te karşılaştırılmıştır. Bu spektrumda 30 dakika depozit edilen numunede Cr_2O_3 kırınım piki daha baskın elde edilmiştir. Bu nedenle depozisyon süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir.



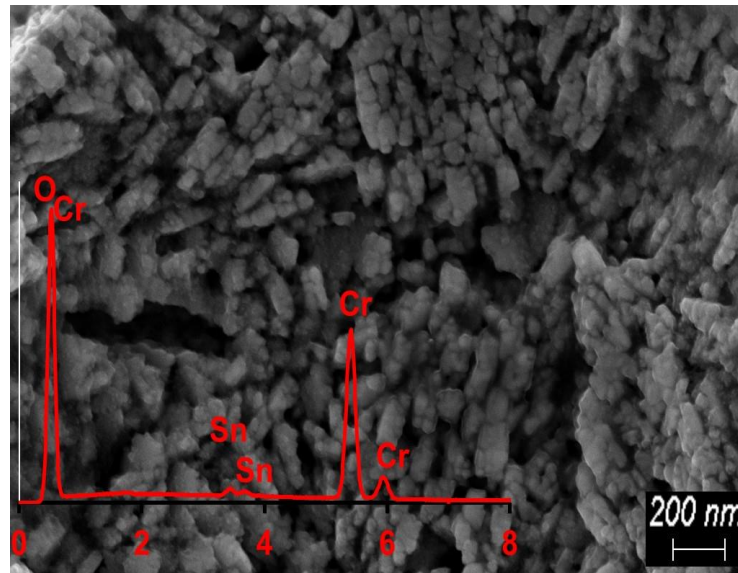
Şekil 3. Farklı depozisyon sürelerinde sentezlenen Cr_2O_3 nanoyapılarının XRD spektrumları

Tavlama sıcaklığının etkisinin belirlenmesi amacıyla -1,4 V sabit potansiyelde 30 dakikada sentezlenen numuneler $400\text{ }^\circ\text{C}$ ve $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlansmıştır. Hazırlanan Cr_2O_3 yapılarının XRD spektrumları kaydedilmiştir (Şekil 4). $500\text{ }^\circ\text{C}$ ısıl işlem uygulanan numunede Cr_2O_3 kırınım piki gözlenmiştir.



Şekil 4. Farklı tavlama sıcaklıklarında hazırlanan Cr₂O₃ nanoyapılarının XRD spektrumları

FTO elektrot yüzeyinde elektrokimyasal olarak hazırlanan Cr₂O₃ nanoyapılarının morfolojik karakterizasyonu için SEM görüntüsü alınmıştır (Şekil 5). Bu SEM görüntüsü incelendiğinde nanoyapıların elektrot yüzeyini kapladığı görülmektedir. Ayrıca alınan EDS spektrumunda (Şekil 5 iç resim), substrattan kaynaklanan pikler ve Cr₂O₃ dışında herhangi bir elemente rastlanmamıştır. Elementel olarak oldukça saf Cr₂O₃ nanoyapılarının sentezlendiği görülmüştür.



Şekil 5. Cr₂O₃ nanoyapılarının SEM görüntüsü (iç resim:EDS spektrumu)

IV. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada literatürde daha önce Cr₂O₃'in elektrokimyasal sentezi için mevcut olmayan bir yöntem önerilmiştir. Cr⁺³ iyonlarını içeren elektrolit ortamından O₂ gazı geçtiği sırada -1,4 V'ta 30 dakika süre boyunca elektrokimyasal depozisyon yapılmıştır. Böylece FTO elektrot yüzeyinde doğrudan krom oksihidroksit

türleri oluşturulmuş ve elektrodun 500 °C'de 1 saat süre ile ısıtılmasıyla bütün krom oksihidroksit türlerinin Cr₂O₃ formuna dönüşümü sağlanmıştır. Yapısal karakterizasyon için XRD tekniğinden faydalanılmış ve Cr₂O₃'in (110) düzlemine ait kırınım piki elde edilmiştir. SEM tekniği ile yapılan morfolojik karakterizasyonda nanoyapılar açıkça gözlenmiştir. FTO elektrot yüzeyinde doğrudan sentezlenen Cr₂O₃ nanoyapıları gelecekte enerji depolama ve dönüşüm uygulamalarında doğrudan kullanılabilirlerdir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde laboratuvar alt yapısının kullanılmasına izin verdiği için Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Dekanlığı'na teşekkür ederiz. Sentezlenen elektrotların karakterizasyonlarının yapılması için desteklerini esirgemeyen Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezi'ne de (DAYTAM) teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Eklund, P., Mikkelsen, N.J., Sillassen, M., Bienk, E.J., & Böttiger, J. (2008). Chromium oxide-based multilayer coatings deposited by reactive magnetron sputtering in an industrial setup. *Surface and Coatings Technology*, 203, 156-159.
- [2] Mougín, J., Bihan, T.L., & Lucazeau, G. (2001). High-pressure study of Cr₂O₃ obtained by high-temperature oxidation by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 62, 553-563.
- [3] Pang, X.L., Gao, K.W., Luo, F., Emirov, Y., Levin, A.A., & Volinsky, A.A. (2009). Investigation of microstructure and mechanical properties of multi-layer Cr/Cr₂O₃ coatings. *Thin Solid Films*, 517, 1922-1927.
- [4] Gordo, E., Chen, G.Z. & Fray, D.J. (2004). Toward optimisation of electrolytic reduction of solid chromium oxide to chromium powder in molten chloride salts. *Electrochim. Acta*, 49, 2195-2208.
- [5] Barros, A.M., Espinosa, D.C.R., & Tenorio, J.A.S. (2004). Effect of Cr₂O₃ and NiO additions on the phase transformations at high temperature in Portland cement. *Thin Solid Films*, 34, 1795-1801.
- [6] Mndar, H., Uustare, T., Aarik, J., Tarre, A., & Rosental, A. (2007). Characterization of asymmetric rhombohedral twin in epitaxial α-Cr₂O₃ thin films by X-ray and electron diffraction. *Thin Solid Films*, 515, 4570-4579.
- [7] Ouyang, J.H., & Sasaki, S. (2001). Effects of different additives on microstructure and high-temperature tribological properties of plasma-sprayed Cr₂O₃ ceramic coatings. *Wear*, 249, 56-66.
- [8] Morisato, T., Jones, N.O., Khanna, S.N., & Kawazoe, Y. (2006). Stable aluminum and chromium oxide clusters as precursors to nanoscale materials. *Computational Materials Science*, 35, 366-370.
- [9] Kohli, N., Singh, O., Anand, K., & Singh, R.C. (2012). Effect of reaction temperature on crystallite size and sensing response of chromium oxide nanoparticles. *Materials Research Bulletin*, 47, 2072-2076.
- [10] Lei, S.J., Peng, X.M., Liang, Z.H., Li, X.P., Wang, C.Y., Cheng, B.C., Xiao, Y.H., & Zhou, L. (2012). Self-template formation and properties study of Cr₂O₃ nanoparticle tubes. *Journal of Materials Chemistry*, 22, 1643-1652.
- [11] Guo, Z.Q., Ping, Z.F., & Chen N. (1996). Production and properties of Cr₂O₃ raw material for refractories. *Industrial Ceramics*, 16, 172.
- [12] Cellard, A., Zenati, R., Garnier, V., Fantozzi, G., & Baret G. (2007). Optimization of chromium oxide nanopowders dispersion for spray-drying. *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 1017-1021.

- [13] Li, M.S., Feng, C.J., & Wang, F.H. (2006). Effect of partial pressure of reactive gas on chromium nitride and chromium oxide deposited by arc ion plating. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 276-279.
- [14] Siab, R., Huvier, C., Kemdehoundja, M., Grosseau-Poussard, J.L., & Dinhut, J.F. (2009). On the relation between damage rate and stress level evolution in α -Cr₂O₃ thin films growing on Ni-33at%Cr. *Corrosion Science*, 51, 2246-2248.
- [15] Shiratsuchi, Y., Kawahara, S.I., Noutomi, H., Arakawa, K., Mori, H., & Nakatani, R. (2011). Effect of crystallinity of Co layer on perpendicular exchange bias in Au-capped ultrathin Co film on Cr₂O₃(0 0 0 1) thin film. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323, 579-586.
- [16] Rafi, U.D., Qu, X.H., Li, P., Lin, Z., Wan, Q., Iqbal, M.Z., Rafique, M.Y., Farooq, M.H., & Islam, U.D. (2012). Superior Catalytic Effects of Nb₂O₅, TiO₂, and Cr₂O₃ Nanoparticles in Improving the Hydrogen Sorption Properties of NaAlH₄. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116, 11924-11938.
- [17] Bates, M.K., Jia, Q.Y., Ramaswamy, N., Allen, R.J., & Mukerjee, S. (2015). Composite Ni/NiO-Cr₂O₃ Catalyst for Alkaline Hydrogen Evolution Reaction. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119, 5467-5477.
- [18] Karuppuchamy, S., Matsui, H., Kira, K., Hassan, M.A., & Yoshihara, M. (2012). Visible light induced photocatalytic activity of Nb₂O₅/carbon cluster/Cr₂O₃ composite materials. *Ceramics International*, 38, 1515-1521.
- [19] Khaleel, A., Shehadi, I., & Shamisi, M.A. (2010). Nanostructured chromium-iron mixed oxides: Physicochemical properties and catalytic activity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 355, 75-82.
- [20] Shaislamov, U., Yang, B.Y., & Park, K. (2012). Enhanced photocatalytic properties of TiO₂ nanotube arrays with Cr₂O₃ nanoparticles under visible light. *Journal of the Korean Physical Society*, 61, 759-763.
- [21] Khassin, A.A., Sipatrov, A.G., Demeshkina, M.P., & Minyukova, T.P. (2009). Partially hydrated iron-chromium oxide catalyst for the Fischer-Tropsch synthesis. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 97, 371-379.
- [22] Kim, A.R., Lee, B., Park, M.J., Moon, D.J., & Bae, J.W. (2012). Catalytic performance on CuO-Cr₂O₃-Ga₂O₃ mixed oxides for water gas shift reaction: Effects of Ga/Cr molar ratio. *Catalysis Communications*, 19, 66-69.
- [23] Tamiolakis, I., Lykakis, I.N., Katsonlidis, A.P., Malliakas, C.D., & Armatas, G.S. (2012). Catalytic performance on CuO-Cr₂O₃-Ga₂O₃ mixed oxides for water gas shift reaction: Effects of Ga/Cr molar ratio. Ordered mesoporous Cr₂O₃ frameworks incorporating Keggin-type 12-phosphotungstic acids as efficient catalysts for oxidation of benzyl alcohols. *Journal of Materials Chemistry*, 22, 6919-6927.
- [24] Wang, F., Fan J.L., Zhao, Y., Zhang, W.X., Liang, Y., Lu, J.Q., Lun, M.F., & Wang, Y.J. (2014). Effects of yttrium-doping on the performance of Cr₂O₃ catalysts for vapor phase fluorination of 1,1,2,3-tetrachloropropene. *Journal of Fluorine Chemistry*, 166, 78-83.
- [25] Khafri M.A., & Lafdani, M.H.K. (2012). A novel method to synthesize Cr₂O₃ nanopowders using EDTA as a chelating agent. *Powder Technology*, 222, 152-159.
- [26] Song, M.Y., Kwon, S.N., Park, H.R., & Munn, D.R. (2011). Effects of fine Cr₂O₃ addition on Mg's hydrogen-storage performance. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 17, 167-169.
- [27] Jin, H., Huang, Y.J., & Jian, J.W. (2015). Sensing mechanism of the zirconia-based highly selective NO sensor by using a plate-like Cr₂O₃ sensing electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 219, 112-118.

- [28] Hao, R., Yuan, J.Y., & Peng, Q. (2006). Fabrication and Sensing Behavior of Cr₂O₃ Nanofibers via In situ Gelation and Electrospinning. *Chemistry Letters*, 35, 1248-1249.
- [29] Yoon, J.W., Kim, H.J., Jeong, H.M., & Lee J.H. (2014). Gas sensing characteristics of p-type Cr₂O₃ and Co₃O₄ nanofibers depending on inter-particle connectivity. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 202, 263-271.
- [30] Stanoiu, A., Simion, C.E., Diamandescu, L., Mihaila, D.T., & Feder, M. (2012). NO₂ sensing properties of Cr₂O₃ highlighted by work function investigations. *Thin Solid Films*, 522, 395-400.
- [31] Montiel, H., Alvarez, G., Conde-Gallardo, A., & Zamorano, R. (2015). Microwave absorption behavior in Cr₂O₃ nanopowders. *Journal of Alloys and Compounds*, 628, 272-276.
- [32] Lebreau, F., Islam, M.M., Diawara, B., & Marcus, P. (2014). Structural, Magnetic, Electronic, Defect, and Diffusion Properties of Cr₂O₃: A DFT+U Study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118, 18133-18145.
- [33] Hehl, F.W., Obukhov, Y.N., Rivera, J.P., & Schmid, H. (2009). Magnetoelectric Cr₂O₃ and relativity theory. *The European Physical Journal B*, 71, 321.
- [34] Boldyrev, Y.I., Ivanova, N.D., Sokolsky, G.V., Ivanov, S.V., & Stadnik, O.A. (2013). Thin film nonstoichiometric chromium oxide-based cathode material for rechargeable and primary lithium batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 17, 2213-2221.
- [35] Sahan, H., Goktepe, H., Patat, S., & Ulgen, A. (2010). Effect of the Cr₂O₃ coating on electrochemical properties of spinel LiMn₂O₄ as a cathode material for lithium battery applications. *Solid State Ionics*, 181, 1437-1444.
- [36] Lin, X.T., Wu, K.Q., Shao, L.Y., Shui, M., Jiang, X.X., Wang, D.G., Long, N.B., Ren, Y.L., & Shu, J. (2014). Facile preparation of Cr₂O₃@Ag₂O composite as high performance lithium storage material. *Journal of Alloys and Compounds*, 598, 68-72.
- [37] Cheng, C.X., Yi, H.Y., & Chen, F. (2014). Effect of Cr₂O₃ Coating on LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ as Cathode for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Electronic Materials*, 43, 3681-3687.
- [38] Khamlich, S., McCrindle, R., Nuru, Z.Y., Cingo, N., & Maaza, M. (2013). Annealing effect on the structural and optical properties of Cr/α-Cr₂O₃ monodispersed particles based solar absorbers. *Applied Surface Science*, 265, 745-749.
- [39] Khamlich, S., Nemraoui, O., Mongwaketsi, N., McCrindle, R., Cingo, N., & Maaza, M. (2012). Black Cr/α-Cr₂O₃ nanoparticles based solar absorbers. *Physica B: Condensed Matter*, 407, 1509-1512.
- [40] Gibot, P., & Vidal, L. (2010). Original synthesis of chromium (III) oxide nanoparticles. *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 911-915.
- [41] Jankovsky, O., Sedmidubsky, D., Sofer, Z., Luxa, J., & Bartunek, V. (2015). Simple synthesis of Cr₂O₃ nanoparticles with a tunable particle size. *Ceramics International*, 41, 4644-4650.
- [42] Gupta, R.K., Mitchell, E., Candler, J., Kahol, P.K., Ghosh, K., & Dong, L. (2014). Facile synthesis and characterization of nanostructured chromium oxide. *Powder Technology*, 254, 78-81.
- [43] Jung, Y.S., Kim, K.H., Jang, T.Y., Tak, Y., & Baeck, S.H. (2011). Enhancement of photocatalytic properties of Cr₂O₃-TiO₂ mixed oxides prepared by sol-gel method. *Current Applied Physics*, 11, 358-361.
- [44] El-Sheikh, S.M., Mohamed, R.M., & Fouad, O.A. (2009). Synthesis and structure screening of nanostructured chromium oxide powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 482, 302-307.

- [45] Ocana, M. (2001). Nanosized Cr₂O₃ hydrate spherical particles prepared by the urea method. *Journal of the European Ceramic Society*, 21, 931-939.
- [46] Tyagi, A.K., Mangamma, G., Kamruddin, M., Dash, S., & Raj, B. (2007). Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Cr₂O₃ and ZrO₂ Ceramic Materials. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 7, 2005-2009.
- [47] Pei, Z.Z., & Zhang, Y. (2008). A novel method to prepare Cr₂O₃ nanoparticles. *Jo Materials Letters*, 62, 504-506.
- [48] Pei, Z.Z., Xu, H.B., & Zhang, Y. (2009). Preparation of Cr₂O₃ nanoparticles via C₂H₅OH hydrothermal reduction. *Journal of Alloys and Compounds*, 468, L5-L8.
- [49] Wei, G.Y., Qu, J.K., Zheng, Y.D., Qi, T., & Guo Q. (2012). Preparation of Cr₂O₃ precursors by hydrothermal reduction in the abundant Na₂CO₃ and Na₂CrO₄ solution. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 19, 978-985.
- [50] Xu, H.T., Lou, T.J., & Li, Y.D. (2004). Synthesis and characterize of trivalent chromium Cr(OH)₃ and Cr₂O₃ microspheres. *Inorganic Chemistry Communications*, 7, 666-668.
- [51] Balachandran, U., Siegel, R.W., Liao, Y.X., & Askew, T.R. (1995). Synthesis, sintering, and magnetic properties of nanophase Cr₂O₃. *Nanostructured Materials*, 5, 505-512.
- [52] Balakrishnan, G., Kuppusami, P., Sairam, T.N., Rao, R.V.S., Mohandas, E., & Sastikumar, D. (2009). Influence of background gas atmosphere on formation of Cr₂O₃ thin films prepared by pulsed laser deposition. *Surface Engineering*, 25, 223-227.
- [53] Egharevba, G.O., Eleruja, M.A., Osasona, O., Akinwunmi, O.O., Olofinjana, B., Jeynes, C., & Ajayi, E.O.B. (2012). Synthesis and Some Properties of Metal Organic Chemical Vapour Deposited Lithium Chromium Oxide Thin Films. *Journal of Materials Science Research*, 1, 130-137.
- [54] He, X., Li, C., Zhu, Q., Hou, B., Jiang, Y., & Wu, L. (2014). Electrochemical mechanism of Cr⁽ⁱⁱⁱ⁾ reduction for preparing crystalline chromium coatings based on 1-butyl-3-methylimidazolium hydrogen sulfate ionic liquid. *RSC Advances*, 4, 64174-64182.
- [55] Liang, S., Zhang, H., Luo, M., Luo, K., Li, P., Xu, H., & Zhang, Y. (2014). Colour performance investigation of a Cr₂O₃ green pigment prepared via the thermal decomposition of CrOOH. *Ceramics International*, 40, 4367-4373.

Araştırma Makalesi - Research Article

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Mevcut Betonarme Binanın Performansının Ve Zemin Etkileşiminin Değerlendirilmesi

Mehmet Fatih Altan¹, Sinan Cansız^{2*}, Osman Kaya³, Çağatay Turna⁴

Geliş / Received: 29/04/2020

Revize / Revised: 22/09/2020

Kabul / Accepted: 01/10/2020

ÖZ

Dünyada yaygın olarak ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde performansa dayalı tasarım prensipleri kullanılmaktadır. 1990'lı yıllarda meydana gelen depremler sonrası hasar alan yapıların tekrar kullanılmaması sebebiyle ağır ekonomik kayıplar yaşanmıştır. Sonrasında birçok yönetmelikte yapıların deprem sonrası kullanımı sağlanacak şekilde hedef performansa göre tasarımına yer verilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinin (TBDY) 2019 yılında yayımlanmasıyla birlikte yapı-zemin etkileşimine daha fazla önem verilmiştir. Bu doğrultuda ilk kez düşey yer hareketi spektrumu tanımlanarak kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca deprem tehlike haritaları yayınlanarak her bölge için spektral ivme katsayıları tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre mevcut betonarme bir binanın performans analizi yapılmıştır. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte (2007) mevcut binaların performans analizinde şekil değiştirme esaslı yaklaşımlar tanımlanırken, TBDY-2019'da ilave olarak yeni binaların tasarımında da şekil değiştirme esaslı yaklaşımlara yer verilmiştir. Bu çalışma ile yeni yayımlanan yönetmeliğin uygulama esasları araştırılmıştır. Çalışmada TBDY-2019'a göre hesaplanmış düzensiz bir yapının performans durumu incelenmiştir. İnceleme sonucunda kontrollü hasar performans düzeyi hesaplanmış yapının yeni yönetmeliğe göre hesap detayları gösterilmiştir. Tüm aşamalarıyla anlatılan düzensiz yapıların performans analizi konusunda, çalışma sahasının genişletilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler- Deprem, İtme Analizi, Performans Analizi

¹İletişim: mehmetaltan@aydin.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0961-0115>)

İnşaat Mühendisliği, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: sinancansiz@aydin.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6375-6487>)

İnşaat Teknolojisi, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul

³İletişim: ce.osmankaya@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6533-949X>)

Yüksek Lisans Öğrencisi, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul

⁴İletişim: turna.cagatay@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-3400-6999>)

Yüksek Lisans Öğrencisi, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul

Evaluation of the Performance and Ground Interaction of the Existing Reinforced Concrete Building According to Turkey Earthquake Building Regulations

ABSTRACT

Performance-based design principles are widely used in national and international regulations in the world. Since the structures damaged after the earthquakes in the 1990s could not be reused, high economic losses were experienced. Later, in many design codes, the design of the buildings according to the target performance was provided so as to ensure the use of the buildings after the earthquake. Turkey Earthquake Building Code (TBDY) is given more importance to the soil-structure interaction with the release in 2018. Accordingly, the vertical ground motion spectrum has been defined and used for the first time. In addition, earthquake hazard maps were published and spectral acceleration coefficients were defined for each region. In this study, a performance analysis of the existing reinforced concrete buildings by the Building Turkey Earthquake Building Code is made. In the Code on Buildings to be built in Earthquake Zones (2007), deformation-based approaches are defined in the performance analysis of existing buildings, while in addition to TBDY-2018, deformation-based approaches are also included in the design of new buildings. With this study, the application principles of the newly published code were investigated. In the study, the performance state of an irregular structure calculated according to TBDY-2019 was examined. As a result of the examination, the calculation details of the structure, for which a controlled damage performance level was calculated, according to the TBDY-2019 code was shown. In terms of performance analysis of irregular structures, which are described in all stages, it is considered to be appropriate to expand this study field.

Keywords- *Earthquake, Push-Over Analysis, Performance Analysis*

I.GİRİŞ

Dünyanın birçok bölgesi ve nüfusun yoğun yaşadığı yerleşim alanları deprem kuşağında yer almaktadır[1]. Bu bölgelerde her gün sayısız depremler kaydedilmektedir. Bunların büyüklüğünün küçük olması sebebiyle birçoğu hissedilmemektedir. Hissedilen büyük depremlerin önceden haber alınamaması veya tahmin edilememesi sebebiyle depreme dayanıklı yapı tasarımı alınacak en önemli tedbir olarak öne çıkmaktadır. Depreme dayanıklı yapı tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli adımlar bulunmaktadır. Bu adımlar sırasıyla; taşıyıcı sistem seçimi, taşıyıcı sistemin doğru modellenmesi, depremin ve yer değiştirme spektrumunun doğru tanımlanması, sonuçların projelendirilmesi ve yapım sürecidir. Bu aşamalar içerisinde malzemenin elastik ötesi davranışını dikkate alan şekil değiştirme limitlerinin doğru tanımlanması ve değerlendirilmesi önem arz etmektedir [1]. 1990'lı yıllarda meydana gelen depremler sebebiyle yaşanan ekonomik kayıplar sonrası performans dayalı tasarım fikri ön plana çıkmıştır. Performans dayalı tasarım prensibine göre yapının maruz kalacağı deprem sonrası olması gereken durumu hedefleyen yaklaşımdır. Bu yaklaşımda hedef performans seviyesi şekil değiştirme sınır değerleri cinsinden tanımlanmaktadır. Önceki yıllarda yapılan tasarımlarda kullanılan kuvvet esaslı yaklaşımlarda deprem sırasında oluşan kesit tesirinden daha dayanıklı olması hedeflenmiştir [2]. Ancak deprem sonrası oluşan hasar durumu veya tekrar kullanımı önemsenmemiştir. Buna karşın her iki yaklaşımda ana hedefi plastik mafsalların kirişlerde olması sağlanarak kat mekanizmasının önüne geçmektir. Performans dayalı tasarım prensibini uygulayan birçok yönetmelikte farklı yöntemler izlenmektedir. Bu yönetmeliklerin bazılarının birbirlerine göre daha üstün olduğu durumların olması ve tek bir doğruya ulaşamamış olması, performans dayalı tasarımın en önemli eksiklerindedir. Mevcut binaların değerlendirilmesi için kullanılan FEMA-273(1997), FEMA 356 (2000), ASCE 41-06 (2007) ve ATC-40 (1996) gibi standartlar yapıların performans düzeyini tanımlanan performans seviyelerine göre tahmin etmektedir [3], [4], [5], [6]. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin Şekil Değiştirmeye Göre Değerlendirme ve Tasarım İlkeleri (ŞGDT) başlıklı 5.1. maddesinin ikinci bendinde, bu değerlendirme yaklaşımının uygulanacağı yapıları Yüksek Binalar, Depreme Yalıtımlı Binalar ve Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi olarak tanımlamıştır [7]. ŞGDT kapsamında; Yüksek Binalar, Mevcut Binaların Değerlendirilmesi Güçlendirilmesi ve Depreme Yalıtımlı Binalar için ayrı ayrı performans hedefleri bulunmaktadır. Bu alanda birçok araştırmacı tarafından çalışmalar ve yönetmelikler yapılmıştır [8], [9],[10],[11],[12]. Bu çalışmada mevcut bir binanın performans değerlendirilmesi yapılarak Tablo1'de gösterilen değerler esas alınarak performans hedefi belirlenmiştir[7].

Tablo 1. Deprem tasarım sınıflarına göre yeni yapılacak veya mevcut binalar için performans hedefleri ve uygulanacak değerlendirme/tasarım yaklaşımları

Deprem Yer H. Düzevi	DTS=1,2,3,3a,4,4a		DTS=1a,2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-4	KK	DGT	-	-
DD-3	-	-	SH	ŞGDT
DD-2	KH	DGT	KH	DGT
DD-1	GÖ	ŞGDT	KH	ŞGDT

II.MATERYAL VE YÖNTEM

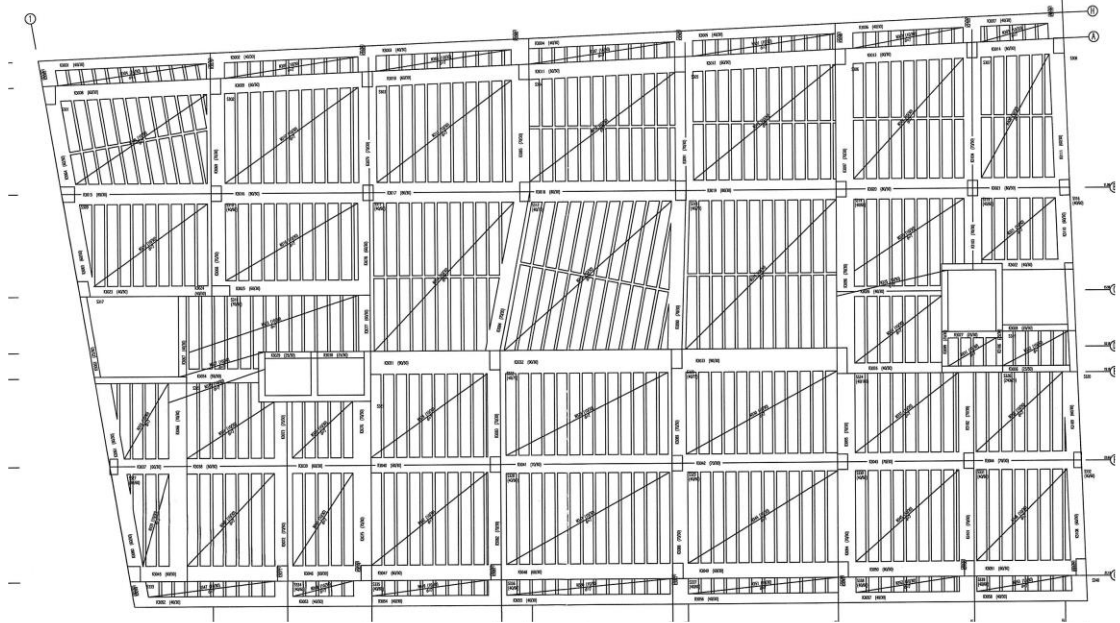
Bu çalışmada İstanbul'da bulunan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) kapsamında tasarlanan bir binanın taşıyıcı sisteme ait elemanların belirlenmesi, zemin emniyeti gerilmeleri, hesaplarda kullanılacak mevcut taşıyıcı sistem kesitlerine ait parametreler, taşıyıcı sistemin geometrisi, malzeme özellikleri detaylı olarak incelenerek performans seviyesi araştırılmıştır [13]. Yapıdan elde edilen bilgiler 6306 sayılı yasa kapsamında toplanmaktadır [14].

A. Yapıya Ait Bilgiler

Yapım yılı 2010, kullanım amacı konut ve betonarme çerçeveden oluşan bina tasarım depremi DD-2 ve Yerel Zemin Sınıfı ZD olarak belirlenmiştir. 2 Bodrum + Zemin + 4 Normal Kat + Çatı Katından müteşekkil binanın kat yüksekliği 3,10m/2,90m'den oluşmakta olup, taban alanı 782,60 m², toplam inşaat alanı ise 6.725,08 m²'dir. Yapıya ait kat planı Şekil 1'de gösterilmektedir. Binaya ait bilgi düzeyi kapsamlı (1.0) olarak tespit edilmiştir. TBDY-2019'agöre hesaplanan deprem parametreleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. TBDY-2019'a göre hesaplanmış deprem parametreleri

Hesap Yöntemi	Değer			
Türkiye Deprem Haritaları [5]	S _s	S ₁	PGA	PGV
	0,989	0,272	0,408	24,991
TBDY-Zemin Değerleri	S _s	F _s	S ₁	F ₁
	0,989	1,104	0,272	2,056
Tasarım Spektral İvme K.	S _{DS}		S _{DI}	
	1,092		0,559	
TBDY 2019 Yatay Elastik Tasarım Spektrumu (s)	T _A	T _B	T _L	
	0,102	0,512	6,000	
Düşey Elastik Tasarım Spektrumu (s)	T _{AD}	T _{BD}	T _{LD}	
	0,034	0,171	3,000	



Şekil 1. Yapının bilgisayar programında modellenmiş kat planı

Yapının deprem etkileri altında performansının belirlenmesi amacıyla, yapının mimari, statik projeleri temin edilerek aşağıda maddeler halinde verilen işlemler uygulanmıştır.

- Taşıyıcı elemanlarında karot alınması,
- Beton dayanımının tespiti,
- Röntgen cihazı ile kolonların donatı çap ve adetlerinin tespiti,
- Donatı çap-adet tespiti ve etriye aralıklarının sıyırma metodu ile yapılarak kontrollerinin sağlanması.

Bu çalışmada Ek-1'de gösterilen yapı üç boyutlu modellenerek statik/performans analizi yapılmış ve performans seviyesi belirlenmiştir. Statik projeden belirlenen malzeme özellikleri ve hesap parametreleri Tablo 3'de özetlenmiştir [15].

Tablo 3. Malzeme özellikleri ve hesap parametreleri

Parametre	Değeri
Beton Dayanımı (MPa)	35
Donatı Çelik Sınıfı	BÇ III- S420
Yerel Zemin Sınıfı	ZD
Tasarım Depremi	DD-2
Yapı Davranış Katsayısı	R=4
Performans Analizi Katsayısı	R=1
Hareketli Yük Katılım Katsayısı	0,3
Bina Önem Katsayısı	1

Betonarme yapıların performans analizinde beton dayanımının tespiti önem arz etmektedir. Beton dayanımının tespiti için tahribatlı ve tahribatsız yöntemler olmak üzere iki metod bulunmaktadır. Bu amaçla yapının beton dayanımının tespiti amacıyla her iki yöntemde kullanılmıştır[16].

B. Yerinde Yapılan Tespit ve Testler

Betonarme yapının donatı durumunu tespit etme amacıyla binada tahribatsız yöntemler kullanılmıştır. Bu amaçla donatı tespit cihazı yardımı ile yapılan tespit sonucu elde edilen donatı oranları ve çapları Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Kolon donatı oranları

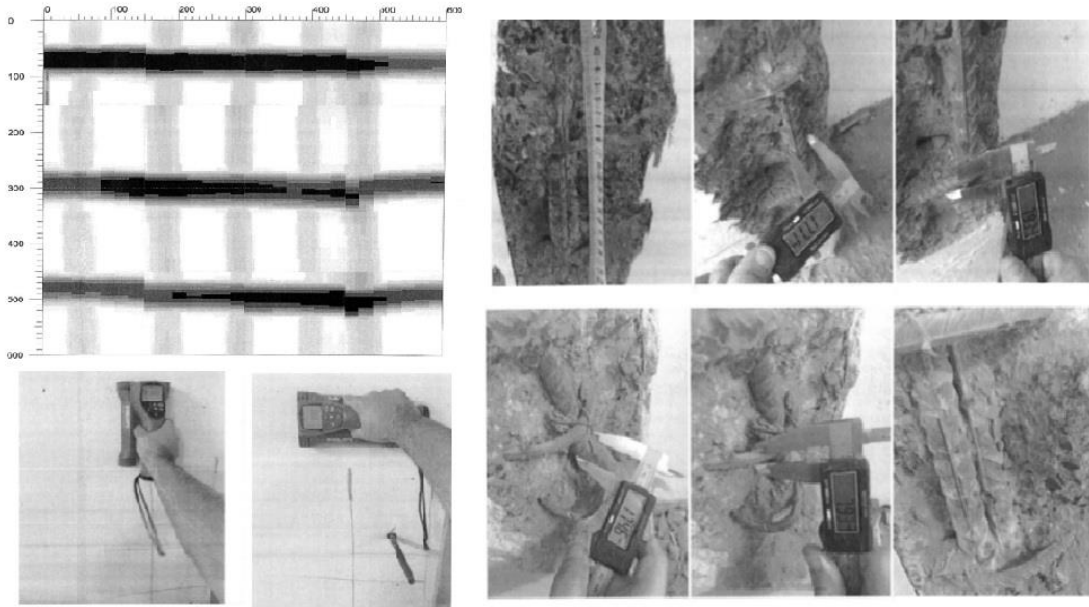
Kolon Adı	b (mm)	h (mm)	d' (mm)	φ (mm)	n (adet)	ρ _t
K1	400	600	30	18	14	0,0148
K2	400	600	30	18	14	0,0148
K3	400	600	30	18	14	0,0148
K4	400	750	30	18	18	0,0145
K5	400	750	30	18	18	0,0145
K6	700	400	30	18	18	0,0145
K7	300	600	30	18	14	0,0148
K8	400	1000	30	18	22	0,0140
K9	400	1000	30	18	22	0,0140

Mevcut taşıyıcı elemanlarının beton dayanımını tespit etme amacıyla tahribatlı yöntemlerden birisi olan karot alma yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla TS EN 12903-3 ve TS-EN 12504-1 standartlarına göre yeter sayıda yapılan karot alma işlemi Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. Kolon karot testi sonuçları

Karot No	Karot Yeri	Karot		Kırılma Yüğü (N)	Basınç Mukavemeti (MPa)
		Çapı (mm)	Yüksekliği (mm)		
1	2.Bodrum Kat Kolon K1	90	90	287600	45,2
2	2.Bodrum Kat Kolon K2	90	90	256800	40,4
3	1.Bodrum Kat Kolon K3	90	90	245700	38,6
4	1.Bodrum Kat Kolon K4	90	90	282460	44,4
5	2.Normal Kat Kolon K5	90	90	262103	41,2
6	Normal Kat Kolon K6	90	90	251288	39,5
7	Normal Kat Kolon K7	90	90	265920	41,8
8	Normal Kat Kolon K8	90	90	269737	42,4
9	Normal Kat Kolon K9	90	90	248743	39,1
Ort. Beton Basınç Dayanımı					41,4

Donatı tespit cihazı yardımıyla kolonlarda görülen donatıların yerinde tespiti amacıyla kolonlarda kabul betonu sıyrılarak donatılar ortaya çıkarılmıştır. Bu yöntem ile donatılarda meydana gelen korozyon seviyesi belirlenmiştir. Bu yapılan işlem Şekil 2’de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Donatı sıyırma sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 6’da gösterilmektedir.



Şekil 2. Donatı tespiti işlemi

Tablo 6. Kolonlara ait donatı sıyırma tespiti

Sıra No	Kolon Adı	Proje donatısı Çapı	Donatı Tespiti			Korozyon
			ϕ_t (mm)	ϕ_s (mm)	s (mm)	
1	K1	18	17,71	8	170	Yok
2	K2	18	17,98	8	90	Yok
3	K3	18	17,46	8	100	Yok
4	K4	18	17,67	8	110	Yok
5	K5	18	17,86	8	80	Yok
6	K6	18	17,19	8	90	Yok
7	K7	18	17,58	8	70	Yok
8	K8	18	17,65	8	110	Yok
9	K9	18	17,94	8	100	Yok

Burada ϕ_t boyuna donatı çapını, ϕ_s enine donatı çapını ve s etriye aralığını ifade etmektedir. Tahribatsız yöntemlerden birisi olan test çekici ile beton dayanım tespiti yapılabilmektedir. Bu yöntem karot ile dayanım tespitine göre daha güvensiz olmakla birlikte ön hazırlık amacı ile yapılan bir işlemdir. Bu yapıda kolon test çekicinden elde edilen sonuçlar Tablo 7’de sunulmaktadır.

Tablo 7. Kolon test çekici sonuçları

No	Kolon Adı	Beton Test Çekici Geri Tepme Değerleri (R _m)										R _{ort.}
1	2.BodrumKatKolonK2	55	56	56	56	57	56	57	56	55	56	56
2	2.BodrumKatKolonK2	52	51	52	52	52	52	52	54	54	54	52.5
3	1.BodrumKatKolonK3	51	50	50	52	51	50	50	52	51	52	51
4	1.BodrumKatKolonK4	59	59	58	59	57	59	58	59	58	57	58.3
5	2.NormalKatKolonK5	57	57	59	58	59	60	60	59	59	60	58.8
6	NormalKatKolonK6	59	59	60	59	58	57	59	59	60	59	58.9
7	NormalKatKolonK7	58	59	58	59	58	59	58	59	58	58	58.4
8	NormalKatKolonK8	56	57	58	57	58	57	58	58	57	58	57.6
9	NormalKatKolonK9	59	57	59	58	58	57	58	59	58	59	58.2

III.PERFORMANS ANALİZİ

Yapıya ait statik projelerden ve saha çalışmalarından elde edilen verilere TBDY (2019) kapsamında performans analizi STA4CAD programı yardımıyla yapılmıştır. Bu amaçla yapı mevcut malzeme dayanımları altında mevcut statik projesine uygun olarak STA4CAD programında modellenmiştir [17]. Programda TBDY (2018)'e göre deprem parametreleri veri giriş ekranına girilmiştir. Yapıdan alınan karot sonuçlarına göre tespit edilen malzeme dayanımları ile sistem modellenmiştir. Yapının 2010 yılında imal edilmiş olması sebebiyle çatlama kesite göre analizi yapılmıştır. TBDY'e göre betonarme elemanlar için tanımlanmış malzeme birim şekil değiştirme sınır değerleri 1-5 denklemlerinde verilmektedir.

$$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.07\sqrt{\omega_{wc}} \leq 0.01 \quad (1)$$

$$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.4\varepsilon_{su} \quad (2)$$

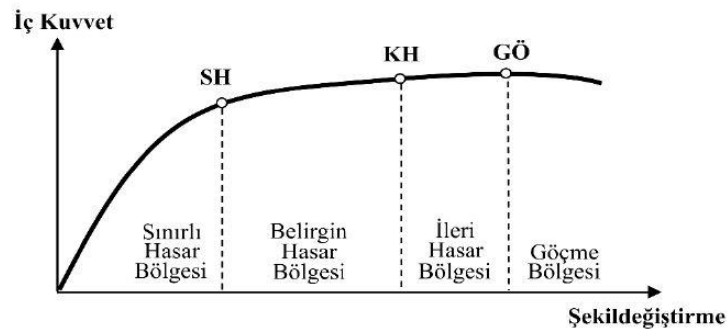
$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right] \quad (3)$$

$$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)} \quad (4)$$

$$\theta_p^{(SH)} = 0 \quad (5)$$

Burada; ε_c en dış beton basınç lifindeki kısılmayı, ω_{wc} enine donatı mekanik indeksi, ε_s boyuna donatıya ait birim uzama, ε_{su} boyuna donatıya ait maksimum gerilme anındaki birim uzama, θ_p elemana ait plastik dönme oranını, ϕ_u kesite ait maksimum eğriliği, ϕ_y kesite ait akma eğriliğini, L_p plastik mafsal boyunu, L_s kolon boyunu ve d_b boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

Performans analizi sırasında kullanılan yazılım ile yapıya uygulanan eşdeğer deprem yükü yöntemi ile tüm yapı elemanlarında oluşan şekil değiştirme değerleri 1-5 denklemleri ile karşılaştırılarak performans seviyeleri ölçülmüştür. TBDY (2019)'a göre tanımlanan hasar bölgeleri Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 3. TBDY göre hasar sınırları

TBDY’de mevcut binalara ait deprem etkilerinin incelenmesi için gerekli kurallar Bölüm 15’de kapsamlı olarak tanımlanmıştır. Hesap yöntemleri için doğrusal ya da doğrusal olmayan hesap yöntemleri seçilebileceği ve bu yöntemler sonucunda şekil değiştirme sınırları belirlenerek deprem performans düzeyinin belirleneceği belirtilmektedir. Bu çalışmada incelenen yapının konut olması sebebiyle BKS=3, DD-2 deprem yer hareket düzeyindeki Normal Performans Hedefinin “Kontrollü Hasar” olduğu görülmüştür.

Kontrollü Hasar Performans Düzeyinde olması beklenen, olası bir deprem etkisi altında önceliğin can güvenliğinin sağlanması kaydıyla, yapının taşıyıcı sisteminde çok ağır olmamakla birlikte onarılması mümkün yapı hasarlarının oluşabileceği kabul edilmektedir. Mevcut Binalarda Kontrollü Hasar Performans Düzeyini TBDY’e göre sağlaması gereken koşullar maddeler halinde sıralanmıştır.

- Betonarme binaların herhangi bir katında, uygulanan her bir deprem doğrultusu için yapılan hesap sonucunda, ikincil (yatay yük taşıyıcı sisteminde yer almayan) kirişler hariç olmak üzere, kirişlerin en fazla %35’i ve düşey elemanların (kolonlar, perdeler ve güçlendirilmiş bölme duvarlar) aşağıdaki paragrafta tanımlanan kadar İleri Hasar Bölgesi’ne geçebilir. Çelik ve prefabrike betonarme binalarda bu istisnalar geçerli değildir. Her kattaki ileri hasar seviyesinde bulunan düşey taşıyıcı elemanlar tarafından taşınan taban kesme kuvvetinin %20’yi geçmemesi, en üst kattaki kesme kuvveti toplamının ise %40’ı geçmemesi,
- İleri Hasar Bölgesi’ndeki düşey elemanların, her bir katta düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine toplam katkısı %20’nin altında olmalıdır. En üst katta İleri Hasar Bölgesi’ndeki düşey elemanların kesme kuvvetleri toplamının, o kattaki tüm düşey elemanların kesme kuvvetlerinin toplamına oranı en fazla %40 olabilir.
- Diğer taşıyıcı elemanların tümü Sınırlı Hasar Bölgesi veya Belirgin Hasar Bölgesi’ndedir. Ancak, herhangi bir katta alt ve üst kesitlerinin ikisinde birden Belirgin Hasar Sınırı aşılmış olan düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetlerinin, o kattaki tüm düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranının %30’u aşmaması gerekir (Doğrusal yöntemle hesapta, alt ve üst düğüm noktalarının ikisinde birden Denk.(7.3)’ün sağlandığı kolonlar bu hesaba dahil edilmezler).
- Yapının doğrusal analizi sonrası elde edilen sonuçlara göre kolonlarda, kirişlerde ve diğer kesitlerde oluşan hasar yüzdeleri Tablo 9-11’de gösterilmektedir.

Tablo 9. Kiriş hasar yüzdeleri

Kat No	(-X)				(+X)				(-Y)				(+Y)			
	SH	BH	IH	GB	SH	BH	IH	GB	SH	BH	IH	GB	SH	BH	IH	GB
9	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	98,3	1,7	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	92,6	7,4	0,0	0,0	88,9	11,1	0,0	0,0
7	94,8	5,2	0,0	0,0	98,3	1,7	0,0	0,0	83,3	16,7	0,0	0,0	85,2	14,8	0,0	0,0
6	94,8	5,2	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	92,6	7,4	0,0	0,0	85,2	14,8	0,0	0,0
5	93,1	6,9	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	88,9	11,1	0,0	0,0	85,2	14,8	0,0	0,0
4	94,8	5,2	0,0	0,0	98,3	1,7	0,0	0,0	88,9	11,1	0,0	0,0	88,9	11,1	0,0	0,0
3	91,4	8,6	0,0	0,0	98,3	1,7	0,0	0,0	94,4	5,6	0,0	0,0	83,3	16,7	0,0	0,0
2	97,3	2,7	0,0	0,0	94,6	5,4	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0
1	100	0,0	0,0	0,0	96,6	3,4	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0

Tablo 10. Kolon hasar yüzdeleri

Kat No	(-X)				(X)				(-Y)				(Y)			
	SH	BH	IH	GB	SH	BH	IH	GB	SH	BH	IH	GB	SH	BH	IH	GB
9	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0
8	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	93,7	6,3	0,0	0,0
7	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0
6	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0
5	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0
4	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	99,8	0,2	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0
3	100	0,0	0,0	0,0	92,5	7,5	0,0	0,0	88,6	11,4	0,0	0,0	94,5	5,5	0,0	0,0
2	100	0,0	0,0	0,0	92,5	4,5	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0
1	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0

Tablo 11. Alt ve üst kesitlerde sınırlı hasar bölgesini aşan kolonların kesme kuvveti dağılımı

Kat No	(-X)		(X)		(-Y)		(Y)	
	SH+BH	IH+GB	SH+BH	IH+GB	SH	BH+IH+GB	SH	BH+IH+GB
9	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0
8	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0
7	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0
6	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0
5	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0
4	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0
3	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0
2	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0
1	100	0,0	100	0,0	100	0,0	100	0,0

TBDY' göre tasarım yapılırken zemin koşullarını, depremsellik durumu ve yapı zemin ilişkisini dikkate alınmaktadır. Temelin Taşıma gücü, temel oturması, yatayda kayma, şişme ve sıkışma durumlarının analiz edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda geoteknik rapor için sismik analiz ve sondaj yapılarak elde edilen sonuçlar dikkate alındığında zeminin taşıma gücü belirlenmiştir. Sismik analizde, MASW yöntemi daha sınırlı derinliğine sahip olmasının yanında, sıg zemin araştırmalarında da kullanılmaktadır [18]. MASW analizi sonucunda 1.tabakada emniyetli taşıma gücü 1,02 kg/cm² iken 2. tabakada emniyetli taşıma gücü 4,18 kg/cm²'ye çıkmıştır. Arazi incelemeleri sonrasında zemin ile ilgili verileri doğrulamak için zemine dönel tip sondaj yapılmıştır. Araziye 2 adet sondaj yapılmış olup, zemin TS EN ISO 22476-3 standardına göre litolojisini, düşey yöndeki değişimi ve yeraltı suyu seviyesi durumuna bakılmıştır. Sondaj çalışması sonucunda, 0-4 m arasında dolgu malzemesi ve 4-8 m arasında kumlu siltli kile rastlanması sebebiyle Presiometre deneyleri yapılmamıştır. SK-1 kuyusundan 0-4 m derinlikte örselenmemiş numunenin taşıma gücü 1,25 kg/cm² belirlenmiştir. Deprem sonrasında oluşan deformasyonlar, yanal zemin basınç katsayısı, sıklık derecesi, aşırı konsolidasyon oranı gibi faktörler SPT direncine etki etmektedir [19]. Taşıma Gücü Tasarım Dayanımı için inceleme alanında gözlemlenen killi-siltli zeminin Terzaghi [20], Mayerhorf [21], Hansen [22] ve Vesic [23] tarafından temel derinliği ve geometrisi ile yatay yüklerin uyguladığı haller için detaylandırılmış ve TBDY'e göre zeminin emniyetli taşıma gücü 1,25 ton/m² olarak bulunmuştur. Yataklanma katsayısı ise Bowles [24]'e göre 1500 ton/m³ olarak alınması gerekmektedir. Bu şartlar altında yapılmış yapı temellerinin Radye Temel yapıldığı görülmüştür. İnşaat yükünün zemine üniform olarak yayıldığı görülmüş olup zeminde yapı hasarı meydana getirecek bir oturma oluşması beklenmemektedir. Radye temellerinde maksimum toplam oturma miktarı, killer için en fazla 12,50 cm olması kabul edilmiştir. İnceleme alanı içinde oturabilecek 5,0 metrelik kil birimler için Konsolidasyon hesabından 5,85 cm değeri bulunmuştur. Sıvılaşma direnci için en yaygın kullanılan arazi deneyi Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) olmaktadır. Şişme potansiyelini Seed [25] ve Holtz & Gibbs'e [26] göre Şişme Potansiyeli "Düşük" olduğu hesaplanmıştır. Sahada yapılan ölçümlerde yeraltı suyuna rastlanılmamıştır. Yapılan taşıma gücü tasarım dayanımı, maksimum taban basıncından yüksek olduğundan dolayı zemin iyileştirmesine gerek duyulmamıştır.

IV.SONUÇLAR

Kontrollü hasar durumunda can güvenliğinin sağlanması için taşıyıcı sistem elemanlarında hasarın onarılmasının mümkün olduğu ve çok ağır hasar olmaması istenmektedir. TBDY 15. Bölümünde de bahsedildiği üzere yapıların hasar durumları ve hasar bölgelerine ait iç kuvvet-şekil değiştirme grafiği Ek-4'te gösterilmektedir. Yapılan analiz sonucunda aşağıdaki verilere ulaşılmıştır.

- Kirişin hasar oranı: (IH =%0.0 <%30) ve (GB=0)
- Kolunun hasar oranı: (IH =%0.0 <%20) ve (GB=0)
- Üst katın kesme oranı: (IH =%0.0 <%40) ve (GB=0)
- Plastikleşen kolonun kesme oranı: (IH+GB=%0.0 <%30)

Yapılan bu çalışmada, İstanbul-Silivri ilçesinde yer alan 2010 yılında inşa edilmiş ve 2 Bodrum + Zemin + 4 Normal Kat + Çatı'dan oluşan konut yapısına ait yerinde karot, test çekici, sıyırma, korozyon, zemin sondajı vb. numuneler alınmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan deneyler sonucunda birtakım veriler elde edilmiştir. Bu deneysel veriler kullanılarak bilgisayar ortamında taşıyıcı sistem elemanlarının kapasiteleri belirlenmiş olup, yapının uygulanan deprem kuvveti etkisindeki sınır durumları tespit edilmiştir. TBDY kapsamında, mevcut bir yapının performans analizini belirlemek için doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemi sonuçları gösterilmiş olup, yapının yönetmelikçe istenen sınır durumlarını sağlayıp sağlamadığına dair kontrol edilmiştir.

Performans analizi üzerine çalışacak ve güçlendirme projesi hazırlayacak mühendislerin, depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı, temel ilkeleri, yönetmeliklerin özünü ve temel kavramlarını, taşıyıcı sistem elemanlarının davranışlarını çok iyi bilmeleri gerekmektedir.

İstanbul İli Silivri İlçesinde bulunan 2010 yılında konut olarak inşa edilmiş bir yapıda, yerinde tarafımızca alınan numunelere, donatı tespitlerine, zemin sondajlarına, deneysel verilere ve bilgisayar ortamında yapılan Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi sonucunda; Deprem hareket düzeyi DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10) ve Deprem tasarım sınıfı DTS=1' e göre Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre konutlar için istenen performans hedefi olan "Kontrollü Hasar" şartını sağladığı görülmüştür. Araştırmacılara kolaylık sağlaması açısından aşamalarıyla belirttiğimiz performans analizi konusunda, farklı düzensiz yapılarda da çalışma sahasının genişletilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Celep, Z., & Kumbasar, N. (2004).*Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*. Beta Dağıtım, İstanbul.
- [2] Chopra, A. K., (2013) *Dynamic of Structures and Earthquake Engineering* (Forth Edition). Pearson.
- [3] Building Seismic Safety Council (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [4] ASCE (2000). "*FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*", ASCE for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., November 2000.
- [5] ASCE 41-06, 2006, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [6] ATC-40. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building*. Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
- [7] TBDY (2019), "*Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*", Çevre Şehircilik Bakanlığı. Ankara.

- [8] Barbara, F., Rui, P., Marco, S., & Roberto, F., (2009). Verification of displacement-based adaptive pushover through multi-ground motion incremental dynamic analyses. *Engineering Structures University of Bologna* 31, 1789–1799
- [9] Tekel, H. (2015), *Bina Deprem Güçlendirme Projelerinin Hazırlanması*. Tekel İnşaat Mühendislik Kitabı.
- [10] Massena, B., Bento, R., & Degée, H., (2010). *Direct Displacement Based Design of a RC Frame- Case of Study*. ISSN: 0871-7869.
- [11] Zameeruddin M., & Sangle KK, (2016). Review on Recent developments in the performance- based seismic design of reinforced concrete structures, *Structures* 6, 119-133.
- [12] Li, D., Wei, R., Xing, F., Sui, L., Zhou, Y., & Wang, W. (2018). Influence of Nonuniform corrosion of steel bars on the seismic behavior of reinforced concrete columns. *Constr. Build. Mater.*, 167, 2032
- [13] *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, <http://www.deprem.gov.tr>, 2007.
- [14] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2019). *6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki Kanun*,
- [15] H. Tekel, (2017), *Yapılarda Hasar Tespiti Yöntemler ve Uygulamalar*. Tekel İnşaat Mühendislik Kitabı.
- [16] Ergün, A., & Kürklü, G., (2005), *Mevcut Betonarme Binalarda Beton Dayanımının Belirlenmesi* (Deprem Sempozyumu).
- [17] STA4-V14.1 “*Structural Analysis for Computer Aided Design*” User Guide
- [18] Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2001). Seismic characterization of geotechnical sites by multichannel analysis of surface waves (MASW) method. *In Tenth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE)*, Philadelphia.
- [19] Seed, H. B., Idriss, I. M., & Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 458-482.
- [20] Terzaghi, K., (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley Publishing, New York, USA.
- [21] Meyerhof, G. G., (1965). Shallow Foundations State of the Art Review Paper, Proc. ASCE, V. 91.
- [22] Brinch, H.J. (1961). A General Formula for Bearing Capacity. Ingenforen (Int. Edition). *The Danish Geotechnical Institute*, Bulten No. 11, pp. 38-46.
- [23] Vesic, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 99(sm1).
- [24] Bowles, J.E., (1988). *Foundation Analysis and Design*, McGraw Hill, 4th Edition, Singapore
- [25] Seed, H. B., & Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 88(3), 53-87.
- [26] Fredlund, D. G. (1975). *Engineering properties of expansive clays*. University of Saskatchewan Transportation and Geotechnical Group.

Araştırma Makalesi - Research Article

Merkezi Havalandırma Sistemlerine Uygun Mutfak Davlumbazına Eklenen Bariyerin Koku Çıkarma Performansına Etkisi

Yusuf Özbakış^{1*}, Fehmi Erzincanlı², Engin Nas³, Tolga Çeviksever⁴

Geliş / Received: 29/04/2020

Revize / Revised: 14/07/2020

Kabul / Accepted: 07/09/2020

ÖZ

Bu çalışmada, merkezi havalandırma sistemlerine uygun mutfak davlumbazına eklenen bariyerin koku çıkarma performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaç için merkezi havalandırma sistemlerine sahip binaların mutfaklarında kullanılan davlumbaz seçilmiştir. Davlumbazın koku çıkarma performansını optimize etmek ve hem deneysel hem de istatistiksel olarak incelemek için Taguchi L_{18} ($6^1 \times 3^1$) deneysel tasarım yönteminden yararlanılmıştır. Seçilen yöntem ile farklı boyutta bariyere sahip mutfak davlumbazları oluşturulmuştur. Deneyler uluslararası standartlara uygun test odasında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde deneylerde oluşturulan davlumbazların koku çıkarma performansı en iyi %97,1 olduğu, en kötü %69,4 olduğu görülmüştür. Farklı boyutlara sahip bariyer ve debi parametreleri ile gerçekleştirilen deneylerin Sinyal/Gürültü oranları incelendiğinde C_2 için en ideal seviyeler A_6B_3 olarak belirlenmiştir. Anova sonuçları incelendiğinde C_2 için en etkili parametrenin %76,01 ile bariyer (cm) ve %21,24 ile debi (m^3/h) olduğu tespit edilmiştir. Davlumbaza eklenen bariyer sayesinde daha yüksek koku çıkarma performansı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Merkezi Havalandırma, Koku Çıkarma Performansı, Taguchi*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: yusufozbakis@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-8439-411X>)

Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi

²İletişim: fehmerzincanli@duzce.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-1454-8459>)

Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi

³İletişim: engin nas@duzce.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4828-9240>)

Dr. Engin Pak Cumayeri Meslek Yüksek Okulu, Düzce Üniversitesi

⁴İletişim: tolgaceviksever@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-5900-0780>)

Ar-Ge Merkezi, Silverline Endüstri A.Ş., Amasya

The Effect of the Barrier Mounted on the Kitchen Hood Suitable for Central Ventilation Systems on the Odour Extraction Performance

ABSTRACT

In this study, the effects of the barrier added to the kitchen hood suitable for central ventilation systems on the performance of odour extraction are investigated. For this purpose, the hood used in the kitchens of the buildings with central ventilation systems has been selected. Taguchi $L_{18} (6^1 \times 3^1)$ experimental design method was used to optimize the odour extraction performance of the hood and to examine it both experimentally and statistically. Kitchen hoods with different size barriers have been created with the selected method. The experiments were conducted in the test room in accordance with international standards. When the results of the experiment were examined, it was observed that the odour extraction performance of the hoods created in the experiments was the best 97.1% and the worst was 69.4%. When the signal/noise ratios of the experiments carried out with different size barrier and flow parameters were examined, the most ideal levels for C_2 were determined as A^6B^3 . When the Anova results were examined, it is determined that the most effective parameter for C_2 was barrier (cm) with 76.01% and flow rate (m^3/h) with 21.24%. By means of the barrier added to the hood, higher odour extraction performance has provided.

Keywords- *Central Ventilation, Odour Extraction Performance, Taguchi*

I. INTRODUCTION

Ventilation is the introduction of clean air and circulation while removing the contaminated air from the environment. The main purpose of ventilation systems is to create optimum conditions by taking into account the air quality and thermal comfort indoors, health, comfort, and productivity for the people in the environment [1].

Today, there are various ventilation strategies in various European countries. In some countries, uncontrolled air leakage and window opening are the only ventilation, while in some countries, ventilation systems are used. In countries with colder climates, only exhaust or balanced exhaust, heat recovery units or mechanical systems have been installed [2,3].

The impact of energy reserves on ventilation rates began in the United States in 1973 with the Arab Oil Embargo. This has led to an increase in energy costs and thus an increase in the heating of buildings. The result of this was the reduction of building ventilation. The decrease in ventilation rates in recent years has increased the prevalence of asthma (the prevalence of the disease in the society) in industrialized countries. In this case, it coincides with the increase in allergic diseases over time [4,5].

Interest in hoods has increased recently in catching polluted air for industrial and civil applications. Hoods are used in many application areas (chemical industry, food industry, industrial warehouses and buildings, etc.) to remove exhaust gases, dirty or contaminated air, and humid air from the environment [6].

The main task of kitchen ventilation is to adequately remove the heat and pollutants resulting from cooking from the area where it is located, with a minimum air flow rate. Effective kitchen ventilation can reduce the exposure of people in the kitchen to air pollutants caused by cooking [7]. Cooking has been considered the main source of indoor pollutants. Visible vapors are produced during the cooking process. These usually include submicrometer particles, such as oil droplets, combustion products, steam, and condensed organic pollutants [8].

As the ventilation rate in kitchens increases, the final pollutant concentration decreases. However, if the hot air in the interior is expelled and the energy expense for ventilation is considered, this means a loss of energy. Therefore, an acceptable 'comfort' and 'confidence' state of steady state concentration must be established. In such a case, less ventilation and therefore less energy needs will be met. However, removal of contaminated air supplies is a more effective way than diluting pollutant concentrations through ventilation to control indoor air quality [9].

In the kitchens, the dirty air produced during cooking processes accumulates in areas with inappropriate ventilation systems. This accumulated polluted air can be bothersome not only for the occupants of the kitchen, but also for those who are in adjacent rooms. Therefore, it is clear that sufficient ventilation system is required to efficiently remove fumes, volatile organic compounds, grease particles and steam from the kitchen area [10].

In this study, the odour extraction performance optimization study of adding barriers to the kitchen hoods of buildings with central ventilation systems was carried out. The experimental design was created according to the Taguchi L_{18} ($6^1 \times 3^1$) orthogonal method. The signal/noise (S/N) ratio and ANOVA analyzes of the results obtained from the experiments were carried out in order to determine the parameters for determining the ideal hood and to decide which parameter is the most effective among these parameters. By means of the mathematical model to be created with regression analysis, it is aimed to eliminate energy consumption and time loss by predicting the output results of the hood to be produced with different values with the same input parameters.

II. MATERIALS AND METHODS

In the kitchens, more efficient and higher performance hoods are required in order to optimally discharge the heat, pollutant air and pollutant gases generated during cooking. Recently, interest in the ventilation performance of kitchen hoods has increased [11]. An inefficient system in filtering and draining the air in the environment poses a risk to the health of all people in the cooking zone [12]. One way to deal with these situations is to increase the performance of hoods used in kitchens.

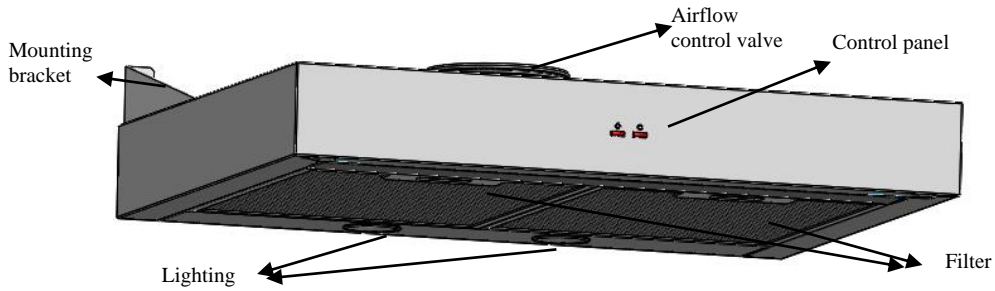


Figure 1. The hood used in the experiment.

A. Hood Flow Adjustment

Hoods use the pressure difference to remove smoke, vapors and harmful gases from the cooking space [13]. The central fan motor used in the central ventilation system creates negative pressure on the hood. By means of the pressure difference formed on the hood, air aspiration (air extraction) is performed. The amount of this air is adjusted by the air flow control valve on the hood. The airflow chart of the hood we use in the experiments is shown in Figure 2. This graph shows the airflow corresponding to the negative pressure created on the hood according to the airflow control valve positions in the hood. There are 5 different ventilation positions (F1, F2, F3, F4, F5) in the hood used. F1, F2, F3, F4 and F5 indicate a 35%, 55%, 75%, 90% and 100% of opening, respectively. These positions indicate the opening amount of the air flow control valve on the hood.

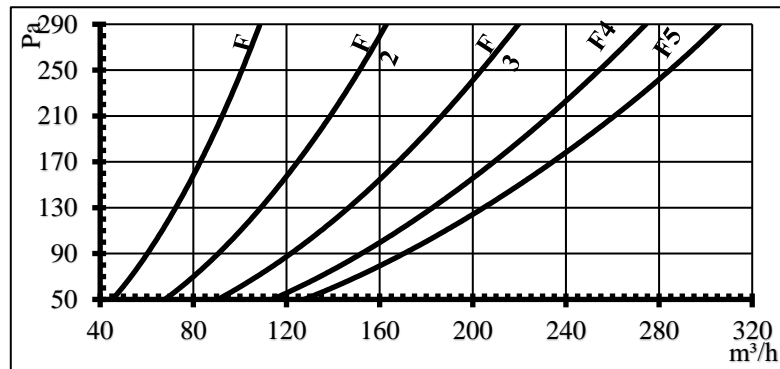


Figure 2. Air flow graph of the hood.

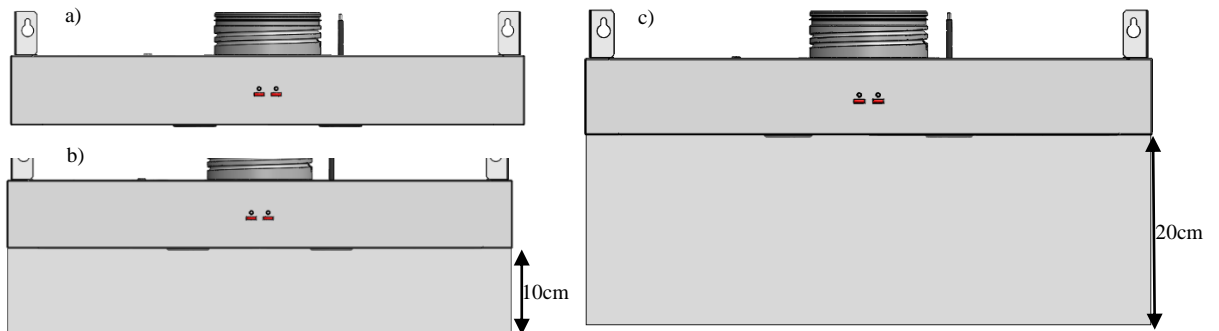


Figure 3. Hoods. a) Without barrier, b) 10cm with Barrier, c) 20cm with Barrier.

6 different airflow values and the central ventilation system kitchen hood with 3 different barrier sizes were chosen for the experiments. 3 different kitchen hoods created for the experiments are shown in Figure 3. Taguchi L₁₈ experimental design method was used to create the experiment design with the selected parameters. The test parameters and level values are shown in Table 1 and the design of the experiment is shown in Table 2.

Table 1. Parameters and levels used in the experimental study.

Factor	Code	Level					
		1	2	3	4	5	6
Airflow (m ³ /h)	A	185	210	235	260	285	310
Barrier (cm)	B	0	10	20			

Table 2. Taguchi L₁₈ experiment design.

Input Parameters			Input Parameters			Input Parameters		
No	A	B	No	A	B	No	A	B
1	185	0	7	185	10	13	185	20
2	210	0	8	210	10	14	210	20
3	235	0	9	235	10	15	235	20
4	260	0	10	260	10	16	260	20
5	285	0	11	285	10	17	285	20
6	310	0	12	310	10	18	310	20

B. Odour Extraction Performance Measurement

The test procedure for measuring the odour extraction performance of central ventilation hoods is specified in standard EN 13141-3. The catch efficiency (O_f) calculation of the kitchen hoods was made as in Equation 1 in accordance with the EN 13141-3 standard. In the equation, C_1 (ppm) refers to the concentration of methyl ethyl ketone (MEK) in the test chamber when the hood is not working and C_2 (ppm) refers to the concentration of the MEK while the hood is operating [14].

$$O_f = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (1)$$

For experiments, firstly 300 grams of distilled water and 12 grams of methyl ethyl ketone (MEK) were mixed and the solution was formed. 100 grams of the previously prepared solution was taken and added to the dosing unit and then dripped into experiment pot heated to 170° C for 10 minutes. After 10 minutes, the evaporated solution was evenly distributed throughout the room by means of a fan with an air flow of 250 m³/h placed in the center of the room. When the value is stable, the concentration (C_1) of the methyl ethyl ketone in the test chamber was measured. Before the second stage, the test chamber was ventilated until the MEK concentration in the test chamber was less than 1%. In the second stage, the experiment hood, whose flow rate was adjusted before, was operated. Then 100 grams of MEK mixture was added to the dosing pump and dripped into experiment pot heated to 170° C for 10 minutes. At the end of 10 minutes, the hood was turned off and the fan in the room was operated, allowing the evaporated solution to be distributed evenly inside the room. When the value was stabilized, the MEK concentration (C_2) was measured in the test chamber. C_2 measurement was done separately for 18 tests with different flow rates and barriers determined before. Before each measurement, the test chamber was ventilated until the methyl ethyl ketone (MEK) concentration was less than 1%. Based on the experimental test data obtained from multiple points in the kitchen, the capture efficiency calculation was made.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Taguchi Experimental Design

Taguchi L_{18} was created using the experimental design method, $3^1 \times 6^1$ (18) experiments shown in Table 1 were made by creating kitchen hoods with different barrier sizes. The performance values of the odour extraction were calculated by means of experimental measurements for different arrangements of the extractor hood. The MEK concentration while the hood is operating (C_2), odour extraction performance and the S / N ratios of the experimental results calculated by the Taguchi method are shown in Table 3.

Table 3. Experimental parameters and results.

Deneş No	Input Parameters		Output Parameters		S/N Ratios		
	Airflow (m ³ /h) A	Barrier (cm) B	Methyl ethyl ketone concentration		Odour extraction performance (%)	Odour extraction performance (%)	
			C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)			
1	185	0		17	69.4	-24.61	36.83
2	185	10		9.5	82.9	-19.55	38.37
3	185	20		5.1	90.8	-14.15	39.16
4	210	0		15.9	71.4	-24.03	37.07
5	210	10		7.5	86.5	-17.50	38.74
6	210	20		4.4	92.1	-12.87	39.29
7	235	0		11.4	79.5	-21.14	38.01
8	235	10		6.3	88.6	-15.99	38.95
9	235	20		3.3	94.1	-10.37	39.47
10	260	0	55.5	10.7	80.7	-20.59	38.14
11	260	10		5.1	90.8	-14.15	39.16
12	260	20		2.4	95.7	-7.60	39.62
13	285	0		10.5	81.1	-20.42	38.18
14	285	10		4.4	92.1	-12.87	39.29
15	285	20		2.1	96.2	-6.44	39.66
16	310	0		9.4	83.1	-19.46	38.39
17	310	10		2.9	94.8	-9.25	39.54
18	310	20		1.6	97.1	-4.08	39.74

The MEK concentration while the hood is operating (C_2) and odour extraction performance (O_f) of the three different hoods created by adding different air barriers to the kitchen hoods used in central ventilation systems were examined. When the test results (Table 3) were examined, the MEK concentration value measured while the hood was operating was measured in experiment 18 with a minimum of as 1.6 ppm and in experiment 1 with a maximum of as 17ppm. When the odour extraction performance (O_f) was examined, it was measured at the lowest as 69.4% in experiment 1 and the highest as 97.1% in experiment 18. Normally, it is necessary to remove 310 m³/h of air from the environment for 83% odour extraction performance, while the same performance is provided by removing 185 m³/h of air from the environment with a hood with 10cm barrier added. In other words, by adding 10 cm barrier to the hood, 125 m³/h of air is prevented from being removed from the environment. Considering the Northern European countries, the energy loss that will occur by removing the hot air in the environment will be prevented.

B. Signal-Noise (S/N) Analysis

The S/N ratio is a tool that statistically measures the performance characteristics of the Taguchi method, and it is a logarithmic function of the response defined as the aim function [16-18]. In this study, since the small of MEK concentration (ppm) values measured while the hood is operating will provide a performance advantage

in the product, “(S/N), the smallest-the best” has been chosen as the quality characteristic (distinctive feature) [19]. S/N ratios of each of the values obtained as a result of the experiment, MEK concentration (ppm) value measured while the hood is operating were calculated by Taguchi method and shown in Table 4.

Table 4. Signal to noise ratios of hoods assembled with experiment parameters.

Signal/Noise Ratios		
C ₂ (ppm)		
Level	Airflow (m ³ /h)	Barrier (cm)
1	-19.438	-21.708
2	-18.133	-14.885
3	-15.832	-9.254
4	-14.114	
5	-13.246	
6	-10.931	
Delta	8.507	12.455
Rank	2	1

The analyzes were performed out according to the smallest best and largest best purpose function. The results are shown in table 4. The ideal parameter for MEK concentration (C₂) values measured while the hood is operating is observed as Level 6 for air flow and Level 3 for the barrier and is graphically shown in Figure 5.

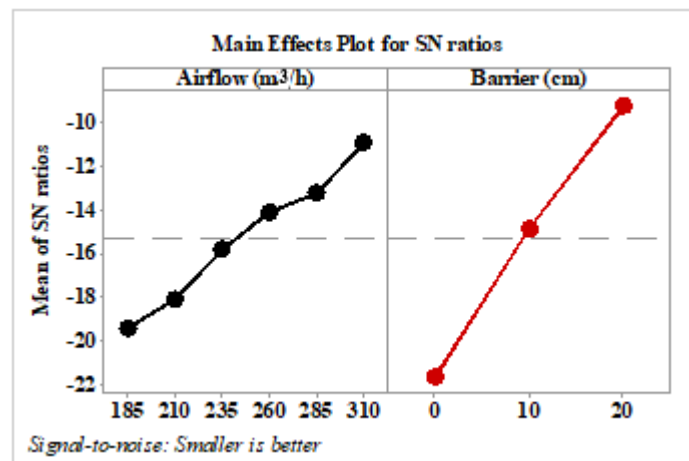


Figure 5. The main effects plot for C₂ (ppm) signal to noise ratios.

C. Anova

In this study, variance analysis was used to determine the numerical effect (%) of the parameters affecting the MEK concentration (C₂) measured while the hood is operating. ANOVA is a method that is used statistically to determine the interactions of control factors among each other [20]. The analysis performed in this study was conducted at the level of 95% confidence and 5% significance [21]. Table 5 shows the numerical effects of the air barrier and air flow rate selected in the experiments on the MEK concentration (C₂) measured

while the hood is operating and odour extraction performance (O_f). The most effective process parameter on the MEK concentration (C_2) measured while the hood is operating had been barrier with 76%.

Table 5. Anova variance analysis for C_2 (ppm).

C_2 (ppm)							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Airflow (m^3/h)	5	76.936	21.24%	76.936	15.387	15.48	0.0001981
Barrier (cm)	2	275.271	76.01%	275.271	137.636	138.44	0.0000001
Error	10	9.942	2.75%	9.942	0.994		
Total	17	362.149	100.00%				
R-sq: 97.25%							

D. Regression Analysis and Estimated Results

Regression analysis is performed for modeling and analysis of various variables that have a relationship between one dependent variable and one or more independent variables [20]. The MEK concentration (C_2) measured while the hood is operating of the experiments created with three different hoods and 6 different flows were calculated by regression analysis. The estimated equations calculated linearly are shown in Table 6.

Table 6. Estimated equations for experimental results.

C_2 (ppm)	=	23.52 - 0.04712 airflow - 0.4667 Barrier
-------------	---	------------------------------------------

IV. CONCLUSIONS

In this study, the parameters affecting the odour extraction performance of the kitchen hoods of the buildings with central ventilation system were examined experimentally and statistically and the results were given as items.

- The odour performance value of hoods created by adding different size air barrier was measured as 69.4% (smallest) and 97.1% (largest).
- When the test results are examined, it is observed that there is a 30.8% improvement in the hood odour extraction performance for the lowest air flow value of the hood to be created with the selected air barrier. For the highest air flow value, it is observed that there is a 16.8% improvement in hood odour extraction performance.
- Higher odour extraction performance has been achieved by means of the barrier added to the hood. When the odour extraction performance are examined, it is observed that the barrier added to the hood is more effective in low airflow value.
- C_2 value of hoods created by adding different size air barrier was measured as 1.6 ppm (smallest) and 17.0 ppm (largest).
- When the Anova results are examined, it is observed that the most effective parameter for C_2 (ppm) is barrier (cm) with rate 76.01% and flow (m^3/h) with rate 21.24%.
- The ideal parameters for C_2 according to signal noise ratios are observed Level 6 for air flow and Level 3 for barrier.
- In subsequent studies, different airflow control valve designs and accordingly air flow, odour, acoustic, and vibration emission measurements of the hoods are recommended.

ACKNOWLEDGMENT

Thanks to Silverline Endüstri A.Ş. and its employees for their support, and also to R&D director Semra ASLAN for their support.

REFERENCES

- [1] Liddament, M. (1996). A Guide to Energy Efficient Ventilation, Air Infiltration and Ventilation Centre, Sint-Stevens-Woluwe. *Belgium*, 85, 9.
- [2] Concannon, P. (2002). *Technical Note AIVC 57: Residential Ventilation*. Air Infiltration and Ventilation Center, Brussels.
- [3] Schild, P. G. (2007). *State-of-the-art of low-energy residential ventilation*. Contributed Report 7.
- [4] Lundbäck, B. (1998). Epidemiology of rhinitis and asthma. *Clinical and experimental allergy: journal of the British Society for Allergy and Clinical Immunology*, 28, 3-10.
- [5] Heinrich, J. (2011). Influence of indoor factors in dwellings on the development of childhood asthma. *International journal of hygiene and environmental health*, 214.1, 1-25.
- [6] Jacobs, P., Cornelissen, E. & Borsboom, W. (2016). Energy efficient measures to reduce PM_{2.5} emissions due to cooking. *Indoor Air conference*, TNO, Delft, Netherlands.
- [7] Stratton, J.C. & Singer, B.C. (2014). Addressing Kitchen Contaminants for Healthy. *Low-energy Homes*.
- [8] Abdullahi, K.L., Delgado-Saborit, J.M. & Harrison, R.M. (2013). Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: a review. *Atmospheric Environment*. 71, 260–294.
- [9] World Health Organization. (1989). Indoor air quality: organic pollutants; EURO report and studies, vol. 111. *Regional Office for Europe*: Copenhagen, Denmark.
- [10] Abanto, J. & Reggio, M. (2006). Numerical investigation of the flow in a kitchen hood system. *Building and environment*, 41(3), 288-296.
- [11] Pinelli, M. & Suman, A. (2014). A numerical method for the efficient design of free opening hoods in industrial and domestic applications. *Energy*, 74, pp. 484–493.
- [12] Lunden, M. M., Delp, W. W., & Singer, B. C. (2015). Capture efficiency of cooking-related fine and ultrafine particles by residential exhaust hoods. *Indoor Air*, 25(1), 45-58.
- [13] Cicconi, P., Germani, M., Landi, D., & Russo, A. C. (2017). A design methodology to predict the product energy efficiency through a configuration tool. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing* (pp. 1095-1105). Springer, Cham.
- [14] European Norm. (2017). Ventilation for buildings - Performance testing of components/products for residential ventilation - Part 3: Range hoods for residential use without fan. EN 13141-3.
- [15] The International Electrotechnical Commission. (2005). Household range hoods - Methods for measuring performance. *IEC 61591*.
- [16] Nas, E., & Öztürk, B. (2018). Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials. *Materials Testing*, 60(5), 519-525.

- [17] Kıvık, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50, 19-28.
- [18] Aslantas, K., Ekici, E., & Cicek, A. D. E. M. (2018). Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based gray relational analysis. *Measurement*, 128, 419-427.
- [19] Akkuş, H., & Yaka, H. (2018). Optimization of Turning Process By Using Taguchi Method. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(5), 1444-1448.
- [20] Nas, E., & Gökkaya, H. (2017). Experimental and Statistical Study on Machinability of the Composite Materials with Metal Matrix Al/B 4 C/Graphite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(10), 5059-5067.
- [21] De Paiva, A. P., Gomes, J. H. F., Peruchi, R. S., Leme, R. C., & Balestrassi, P. P. (2014). A multivariate robust parameter optimization approach based on Principal Component Analysis with combined arrays. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 186-198.

Araştırma Makalesi – Research Article

Cam Ambalaj Üretimini Çevresel Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi

Burçin Atılgan Türkmen^{1*}

Geliş / Received: 09/05/2020

Revize / Revised: 21/07/2020

Kabul / Accepted: 21/07/2020

ÖZ

Sürdürülebilirlik anlayışının gittikçe önem kazanması ile hızla gelişmekte olan ambalaj sektörü üretim sektörünün sürdürülebilirliğinin artırılabilmesi için önemli bir etken konumuna gelmiştir. Günümüzde ambalaj sektörünün çevresel sürdürülebilirliği tam olarak bilinmemektedir. Bu sebepten dolayı bu çalışmada içecek sektöründe kullanılan cam ambalajın çevresel sürdürülebilirliğinin yaşam döngüsü boyutunda analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında içecek sektöründe kullanılan cam ambalaj için tesis inşaatı ve kurulumu, ham madde elde edilmesi ve işlenmesi, ulaşım, üretim ve tesis atık yönetimi aşamalarındaki çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Yaşam döngüsü analizi uluslararası standartlar olan ISO 14040 ve ISO 14044 serisine göre uygulanmıştır. CML 2001 etki değerlendirme yöntemi kullanılarak on bir adet çevresel etki kategorisi değerlendirilmiştir. Çalışmamızda 1 kg cam şişe üretiminin küresel ısınma potansiyeli 1,2 kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Cam şişenin yaşam döngüsü karbon ayak izinin yaklaşık olarak %84'ü üretim, %7'si ham madde elde edilmesinden, %5'i taşımacılıktan, %3'ü tesis kurulumu ve kalan kısmının da atık yönetimi basamağından kaynaklandığı bulunmuştur. Hesaplanan çevresel etkiler incelendiğinde en fazla etkinin geldiği yaşam döngüsü basamağının enerji yoğunluğundan dolayı cam üretimi (%4,6 ADP-%89,0 MAETP) olduğu görülmüştür. Yapılan çevresel sürdürülebilirlik değerlendirmesi sonucunda üretim basamağından kaynaklanan emisyonların azaltılması için enerji ve ham madde girdileri ile ilgili iyileştirme çalışmalarının yapılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Yaşam Döngüsü Analizi, Sürdürülebilirlik, Cam, Karbon Ayak İzi, Çevresel Etki*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: burcin.atilganturkmen@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3220-3817>)
Kimya Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye

Assessing the Environmental Sustainability of Glass Packaging

ABSTRACT

With the increasing importance of the sustainability approach, the rapidly developing packaging sector has become an important factor for increasing the sustainability of the production sector. Today, the environmental sustainability of the packaging industry is not fully known. Therefore, this study aims to estimate the life cycle environmental impacts of glass packaging used in the beverage industry. Within the scope of the study, environmental impacts from plant construction and installation, raw material extraction and processing, transportation, production, and waste management stages were evaluated for glass packaging used in the beverage industry. Life cycle analysis has been applied according to the international standards ISO 14040 and ISO 14044. The CML 2001 method has been selected to estimate the eleven environmental impacts. The total GWP is estimated at 1.2 kg CO₂ equivalent per kg glass bottle. The production stage is the major contributor, accounting for 84% of the total GWP followed by raw materials extraction and processing (7%), transportation (5%), plant installation (3%) and waste management (1%). The results show that the life-cycle step with the most environmental impact is the glass production step (4.6% ADP-89.0% MAETP) due to the high energy consumption. As a result of the environmental sustainability assessment, improvements in energy and raw material inputs are required to reduce emissions from the production step.

Keywords- Life Cycle Assessment, Sustainability, Glass, Carbon Footprint, Environmental Impacts

I.GİRİŞ

Toplumların çevre bilincinin arttığı günümüzde bir ürünün, üretimin ya da hizmetin maliyet ve performans gibi değerlendirme kriterlerinin yanında artık doğal kaynak kullanımı ve çevre sorunları gibi etkileri de karar verme süreçlerinde gittikçe daha sık göz önünde bulundurulmuş faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Hayatın sağlıklı olarak devam ettirilebilmesi için, üretim sürecinde doğal kaynaklar ve ekosistem üzerindeki etkileri en aza indirmek gerekmektedir. Son zamanlarda küresel bir problem olan iklim değişikliğinden kaynaklanan endişelerden dolayı daha sürdürülebilir ürün ve üretim süreçlerine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Çevre dostu ürünlere talep artarken firmaların ürünlerini ve üretim süreçlerini incelemesi ve gerekli değişiklikleri yapmaları gerekmektedir. İnsanların teknoloji ile tanışması, yaşam standartlarının yükselmesi ve perakende ürünlere olan talebin artmasıyla birlikte ambalaj sanayi hızla gelişmektedir. Günümüzde ambalaj üretim, depolama, koruma, ulaştırma, dağıtım, reklam, satış ve son kullanıma kadar üretimin her aşamasında devreye girmektedir. Kısaca ambalaj yalnızca içerisine konulan ürünü koruyan bir taşıyıcı araç değil, ürünün bir parçası haline gelmiştir [1, 2].

Küresel ambalaj sektörü çok geniş bir endüstri koludur. Küresel ambalaj ithalatı 2015 yılında 259 milyar \$ seviyesindeyken bu rakamın %57'sini plastik ambalajlar, %30'unu kağıt-karton ambalajlar, %8'ini metal ambalajlar, %3,5'ini cam ambalajlar ve %1,5'ini ahşap ambalajlar oluşturmuştur. 2015 yılı küresel boyutta ambalaj ihracatı yaklaşık bir önceki yıla göre %9 oranında azalarak 261 milyar \$ olmuştur. Ambalaj sektöründeki toplam ihracatın %57'sini plastik ambalaj, %30'unu kağıt-karton ambalaj oluşturmaktadır. Ülkemizde de ambalaj sektörü diğer ülkelerde olduğu gibi hızla gelişmektedir [3].

Cam silika kum, soda ve kalsit gibi maddelerin uygun şartlarda ergitilmesi ile oluşan bir takım oksitlerin meydana getirdiği sert, saydam, kimyasal dayanıklılığı yüksek ve kırılma yapıya sahip olan amorf bir maddedir [2]. Cam ambalaj üretimi, enerji ve ham madde yoğun endüstriyel süreçlerden biridir. Ham maddelerin ergitilmesi için yüksek sıcaklık gereklidir ve bundan dolayı cam prosesinde yoğun miktarda termal enerji kullanılmaktadır. Cam üretiminde fosil yakıtların yanması sonucunda oluşan sera gazı emisyonları yükündür. Ayrıca, cam üretimi toz, granül ve tozlu ham maddelerin kullanımını içeren bir süreçtir ve bu malzemelerin depolanması ve taşınması, toz emisyonları için önemli bir potansiyeli temsil eder [4]. Gıda ve içecek üretiminden kaynaklanan çevresel etkilerin gıda, içecek ve ambalaj malzemesinin türüne göre %45'e kadar ambalajdan kaynaklandığı bulunmuştur [5]. Bu da ambalajın sürdürülebilirlik açısından ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu yüzden en az ham madde, doğal kaynak ve enerji kullanımı ile sürdürülebilir ambalaj üretimini sağlamak gıda ve içecek sektörü için önemli bir noktadır [6].

Sürdürülebilir ambalaj sistemlerinin sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi için Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) önemli bir araçtır. Literatüre baktığımızda bu aracı kullanarak cam içecek ambalajlarının sürdürülebilirliğinin incelendiği çalışmalar bulunmuştur. Bettens and Bagard [7] raporlarında değişik cam ambalaj türlerinin çevresel etkilerini yaşam döngüsü boyutunda değerlendirmiştir. Çalışmada ham madde elde edilmesi ve işlenmesi, cam ambalaj üretimi, kullanımı ile cam ambalajın bertaraf ve geri dönüşüm basamakları incelenmiştir. Geri dönüşümsüz cam ambalaj ile %100 geri dönüşümlü cam ambalaj için iklim değişikliği, zehirlilik, ötrofikasyon, arazi kullanımı, enerji ve kaynak tüketimi, radyasyon gibi etki kategorileri için çevresel etki karşılaştırılması yapılmıştır. Bunlara ek olarak değişik yakıt alternatifleri için modeller oluşturulmuş sonuçlar karşılaştırılmıştır. Cattaneo [8] çalışmasında Kuzey Amerika'da üretilen cam ambalaj alternatiflerinin ham madde elde edilmesinden son kullanımına kadar çevresel sürdürülebilirliğini analiz etmişlerdir. Fosil yakıt tüketimi ve iklim değişikliği kategorileri için sonuçlar elde edilmiştir. Geri dönüşümün bu kategorilere etkisi de bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda 1 kg cam üretimi için yaklaşık 17 MJ fosil yakıt harcanırken 1,3 kg CO₂ emisyonunun açığa çıktığı bulunmuştur. Yaşam döngüsü basamakları incelendiğinde en fazla etkinin camın ergitilmesi basamağından kaynaklandığı bulunmuştur. Doublet [9] yaptığı çalışmada, polietilen tereftalat (PET) ve cam ambalaj alternatiflerinin yaşam döngüsü çevresel etkilerini karşılaştırılarak değerlendirmiştir. Bu çalışmada fosil yakıt kullanımı yerine yenilebilir enerji kaynakları kullanımı şeklinde değişik enerji senaryoları oluşturulmuştur. Cam şişe için şişe üretimi işlemi, ambalajın çevresel etkilerinin ortalama %50'sine sebep olurken diğer yaşam döngüsü aşamalarından olan şişenin kapaklanması ve satış noktalarına dağıtılmasının çevresel etkilere olan katkısı sırasıyla ortalama %20 ve %14 olarak bulunmuştur. Cam şişe tekrar kullanıldığında çevresel etkilerinin %12'sinden daha azına sahip olduğu görülmüştür. PET ambalaj için PET malzemenin üretim basamağı çevresel etkilerin %60'ını oluşturmaktadır. İkinci en büyük çevresel etki ise %20 ile şişenin üretim işleminden

kaynaklanmaktadır. Bertaraf basamağı %7'lik etki oluşturmaktadır. Yay [10] çalışmasında ambalaj atıkları yönetiminin çevresel etkilerini yaşam döngüsü analizi yöntemi ile belirlemiştir. Bu çalışmada 3 senaryo hazırlanmıştır. İlk iki senaryoda gerçek ve yönetmeliğe uygun oranlarda geri dönüşüm yapılırken, üçüncü senaryoda herhangi bir geri dönüşüm uygulanmadan ambalaj atık depolamaya gönderilmektedir. Sonuçlar ambalaj atıklarının depolanmasının en kötü bertaraf yöntemi olduğunu göstermiştir. En büyük çevresel etkinin ise su ekotoksitesitesi ile ozon tabakasının incelenmesi ve fosil yakıtların tüketimi kategorilerinde olduğu bulunmuştur. Falkenstein, Wellenreuther [11], içecek ambalajlarının çevresel sürdürülebilirliği konusunda genel bir model çıkartılabilmesi için bu konuda literatürde bulunan yaşam döngüsü analizi çalışmalarını değerlendirerek karşılaştırmıştır. Karşılaştırılan çalışmalarda iklim değişikliği, ozon tabakası incelenmesi, ötrofikasyon, asidifikasyon, toksik emisyonlar, enerji ve su tüketimi, arazi kullanımı, zehirlilik ve geri dönüşüm oranları gibi çevresel etki göstergeleri ele alınmıştır. Analiz edilen çalışmaların sonuçlarının değişiklik gösterdiği ve bu yüzden genel bir model çıkarımının zor olduğu sonucuna varılmıştır. Planlanan model için bu sektörde daha fazla yaşam döngüsü analizi çalışmasına ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Özgen [12], ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirliğin firma stratejisi açısından ambalaj tasarımına etkilerini araştırmıştır. Ambalaj türü olarak PET ve cam şişe incelenmiştir. Hizmet satın alma ve yaşam döngüsü maliyeti ekonomik sürdürülebilirlik için karşılaştırılmıştır. Çevresel yönden sürdürülebilirlik için ise yaşam döngüsü analizi, çevre için tasarım, entegre ürün politikaları ve ürün odaklı çevresel yönetim sistemleri incelenmiştir. Bu çalışmada sadece bazı çevresel etkiler bulunmuş olup ve herhangi bir alternatif sunumu yapılmamıştır.

Ambalaj sektörü hızla büyüyen bir sektör olmasıyla birlikte bu sektöre ait sürdürülebilirlik etkileri tam olarak bilinmemektedir. Literatürde var olan çalışmalarda genel olarak ambalaj malzemesinin geri dönüşüm sürecini inceleyen çevresel etki analizleri yapılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada cam ambalaj malzemesinin çevresel sürdürülebilirliğinin yaşam döngüsü boyutunda analizi hedeflenmiştir. İçecek sektöründe kullanılan cam ambalaj için tesis kurulumu, ham madde elde edilmesi ve hazırlanması, ulaşım, üretim ve tesis atık yönetimi aşamalarındaki çevresel etkiler değerlendirilmiştir.

II.YÖNTEM

YDA, bir ürünün, sürecin ya da hizmetin ham maddelerin elde edilmesinden başlayarak, üretim, ulaşım, kullanım ve kullanım sonrası atık yönetimini de kapsayan yaşam döngüsünün farklı aşamalarındaki çevresel etkileri inceleyen uluslararası kabul görmüş sistematik bir yöntemdir. Bütünsel yaşam döngüsünü dikkate alınarak yapılan bu analiz sonucunda değerlendirilmekte olan ürün, süreç ya da hizmetin tüm yaşam döngüsü basamaklarında ortaya çıkabilecek her tür çevresel etki değerlendirilip tüm detaylar göz önünde bulundurularak iyileştirme veya karşılaştırma olanağı sunulmaktadır [13].

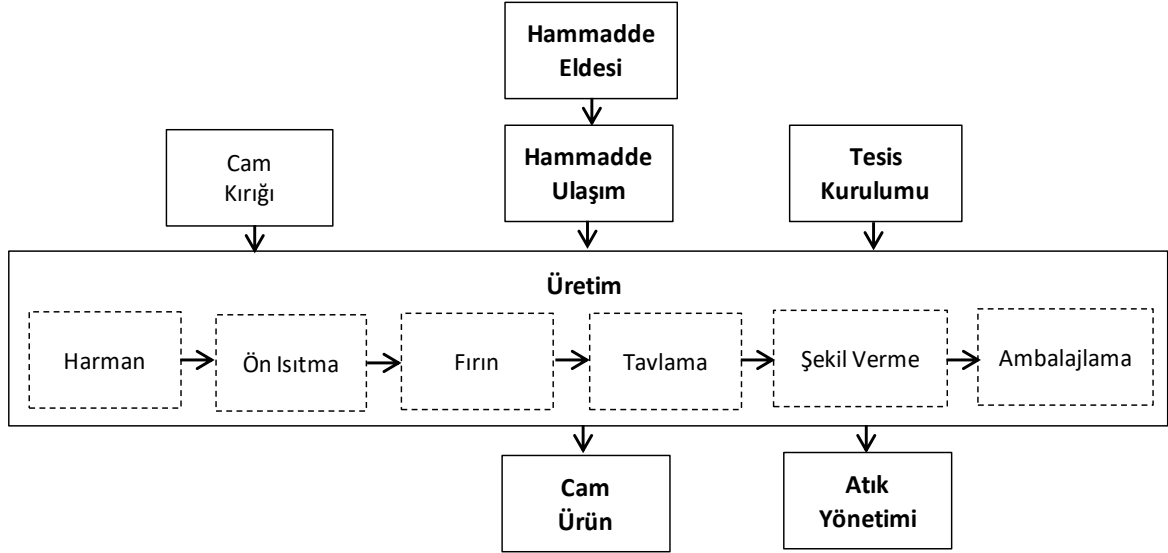
Cam ambalaj için yapılan bu YDA çalışması ISO 14040 ve 14044 serisi [14, 15] uyarınca gerçekleştirilmiştir. Bu standart serisi, yaşam döngüsü analizi çalışmalarının gerçekleştirilmesine ve bildirilmesine yönelik genel çerçeveyi, prensipleri ve gereklilikleri belirtmektedir. Bu çalışmada YDA birbiri ile ilişkili dört adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adım olarak çalışmanın amacı, kapsamı, sistem sınırları ve sistem için fonksiyonel birim tanımlanmıştır. Çalışmanın ikinci basamağında yaşam döngüsü envanter analizi için sisteme giren ham madde ve enerji bileşenleri ile sistemden çıkan ürün ve diğer bileşenler fonksiyonel birim ile ilişkilendirilerek hesaplanmıştır. Bundan sonraki aşamada yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ile cam şişe üretim sürecinin tüm bileşenleri için çevresel etki kategorileri GaBi ts v9.2 [16] yazılımı kullanılarak CML 2001 yöntemi [17] ile hesaplanmış olup son aşamada ise bu sonuçlar yorumlanmıştır.

A. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı içecek sektöründe kullanılan cam ambalajın yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliğinin incelenmesi ve bu ambalaj türü için potansiyel çevresel sürdürülebilirlik iyileştirme olanaklarının belirlenmesidir. Çalışmada ambalaj tipi olarak %44 oranında geri dönüşümlü malzeme ile üretilmiş beyaz cam şişe seçilmiştir. Çalışmanın fonksiyonel birimi istenilen özellikteki şekillendirilmiş ve ambalajlanmış 1 kg beyaz cam şişe olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın kapsamı içerisinde cam ambalajların üretimi için tesis inşaatı ve kurulumu, ham madde elde edilmesi ve hazırlanması, nakliye, cam üretimi ve tesis içerisindeki atık yönetimi aşamaları bulunmaktadır.

Tüketicinin ürünü kullanması basamağı ambalaj sistemleri için etki oluşturmadığından dolayı sistem sınırlarına dahil edilmemiştir. Atık yönetimi basamağı için sadece üretim tesisi dikkate alınmıştır. Cam ambalaj üretiminin yaşam döngüsü basamakları genel kapsamda Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ambalajın içine konulan içeceğin çevresel etkisi çalışmanın kapsamı dışındadır.



Şekil 1. Cam ambalaj sistemleri için yaşam döngüsü basamakları

Oluşturulan modeldeki ambalaj sistemleri için belirlenen yaşam döngüsü basamakları:

- Tesis kurulumu aşaması: Fabrikanın inşaatı ve fabrikada kullanılan sistemlerin kurulumu basamağıdır.
- Ham madde temini aşaması: Ham maddelerin elde edilmesi ve ham maddelere uygulanan ön işlem süreçlerini içerir.
- Ham madde nakliyesi aşaması: Her bir ham maddenin tesise nakliyesini kapsar.
- Üretim aşaması: Ham madde hazırlama (harman), ön ısıtma, fırın, tavlama, şekillendirme ve ambalajlama basamaklarından oluşmaktadır.
- Atık yönetimi aşaması: Tesis içerisinde oluşan atıklara uygulanan işlemleri içerir.

B. Envanter Analizi

Çalışmada envanter analizi veri toplama ve her bir yaşam döngüsü basamağı için girdi ve çıktı hesaplama işlemlerinden oluşmaktadır. Çalışmamızın temelini oluşturan veriler ülkemizde üretim yapmakta olan bir cam firmasından temin edilmiştir. Firmadan elde edilemeyen veriler için ise Türkiye’de cam üretimi yapmakta olan diğer firmaların sektör ve sürdürülebilirlik raporları kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada, arka plan verileri için Ecoinvent veri tabanı [18] kullanılmıştır. Kullanılan veri tabanlarında Türkiye verisi olmadığı için seçimlerde tesisin verdiği bilgilere göre en uygun olan verilerin seçilmesine dikkat edilmiştir.

Tesis kurulumu basamağı fabrikanın inşaatı, fabrikada kullanılan cihazların ve fırının kurulumunda kullanılan ham madde ve enerji tüketimi bilgilerini içerir. Veri eksikliğinden dolayı bu basamak için Hischier [19] raporunda cam ambalaj üretim tesisi için sunulan veriler kullanılmıştır.

Cam üretiminde kullanılan başlıca ham maddeler: silis kumu, soda, kalker, dolomit ve feldspattır. Cam üretiminde kullanılan en önemli ham maddeler Türkiye’de bulunduğu ve üretildiği için, cam üretimi büyük oranda yerli ham madde ile gerçekleştirilmektedir. Cam üretimi yapan fabrikanın Bilecik il sınırları içerisinde olduğu varsayılmıştır. Bu varsayıma bağlı olarak ulaşım verileri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan ulaşım verileri

Ham madde	Şehir/Ülke	Kara yolu (km)	Şehir/Ülke	Kara yolu (km)	Deniz yolu (km)
Silis Kumu	Bilecik/Türkiye	40	Kahire/ Mısır	750	640
Soda	Mersin/Türkiye	785	-	-	-
Feldspat	Bilecik/Türkiye	40	-	-	-
Dolomit	Bilecik/Türkiye	40	-	-	-
Kalker	Bilecik/Türkiye	40	Kırklareli/Türkiye	300	-
Cam Kırığı	Bilecik/Türkiye	100	-	-	-
Ambalaj	Kocaeli/Türkiye	150	-	-	-

Çalışmamızda cam kırıklarının fabrika dışından ve fabrika içinden sağlanarak belirli oranda tekrar üretime girdiği yani camın geri dönüştürüldüğü varsayımı yapılmıştır. Bu çalışma için seçilen cam %44 oranında cam kırığı içermektedir. Tablo 2’de yaşam döngüsü modellemesinde kullanılan ham maddeler ve miktarları verilmiştir. Tesise getirilen ham maddeler silolarda depolanıp harman hazırlama kısmında camın türüne göre belirlenen reçeteye uygun olarak karıştırılır. Karıştırma işlemi karıştırıcı içindeki bıçaklar yardımıyla yapılır. Hazırlanan harman konveyör bantlarla fırına taşınır. Taşıma işlemi sırasında cam kırığı da istenilen miktarda harmana ilave edilir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan ham madde verileri

Ham madde	Miktar (kg)
Silis Kumu	0,35
Soda	0,11
Feldspat	0,04
Dolomit	0,02
Kalker	0,11
Cam Kırığı	0,50

Hazırlanan harman 1550-1650 °C’ye kadar çıkarılarak eriyik cam elde edilir. Cam ergitme yüksek sıcaklıklara dayanıklı fırınlarda yapılmaktadır. Türkiye’deki orta ya da büyük işletmelerde fırınları ısıtmak için doğalgaz kullanılmaktadır. Homojen sıcaklığa ulaşan eriyik camın verimli bir şekilde şekillendirilmesi için uygun olan sıcaklık değerine (500 °C civarı) soğutulması gereklidir. Bu işlem sonucunda stabil ve homojen dağılmış ve istenilen sıcaklığa ulaşmış eriyik cam elde edilmiş olur. Erimiş haldeki karışım, şekillendirme kısmına verilir. Cam şişenin şekillendirilmesi makine ile yapılmaktadır. Şekillendirilen cam yeniden ısıtılıp çevre sıcaklığına kadar soğutulmuş iç gerilmeler yok edilir ve cam daha dayanıklı hale gelir. Soğutma ünitesi toplama bandından çıkan ürünler cam üretiminin son basamağı olan paketleme kısmına gelmektedir [4]. Cam şişenin ambalajlanması için polietilen, karton ve ahşap palet kullanılmıştır [19].

Oluşturulan yaşam döngüsü modelinde Türkiye şebeke elektriği kullanılmıştır. 2018 yılı temel alınarak Türkiye şebeke elektriğinden gelen yaşam döngüsü boyutundaki çevresel etkiler daha önce yapılan çalışma [20] temel alınarak Türkiye elektrik üretim istatistikler [21] kullanılarak hesaplanmıştır. Doğalgaz verileri de Türkiye için yayınlanan doğalgaz raporundan [22] elde edilen veriler temel alınarak modellenmiştir. Tablo 3'te yaşam döngüsü modellemesinde kullanılan enerji verileri sunulmuştur.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan enerji verileri

Enerji türü	Kullanılan enerji miktarı (MJ/fonksiyonel birim)
Elektrik	0,92
Doğalgaz	3,75

Atık yönetimi cam ambalajın üretimi sırasında oluşan atık suyun arıtılması ve katı atığın geri dönüştürülmesi veya bertaraf edilmesi basamaklarını içermektedir. Üretim sırasında oluşan atık suyun, tesis içerisinde bulunan atık su arıtım tesisinde arıtıldığı varsayılmıştır. Ham madde atıkları, atık yağlar ve ambalaj malzemeleri gibi katı atıkların %50 oranında geri dönüştürülürken %50 oranında bertaraf edildiği varsayılmıştır [19].

III.BULGULAR VE TARTIŞMA

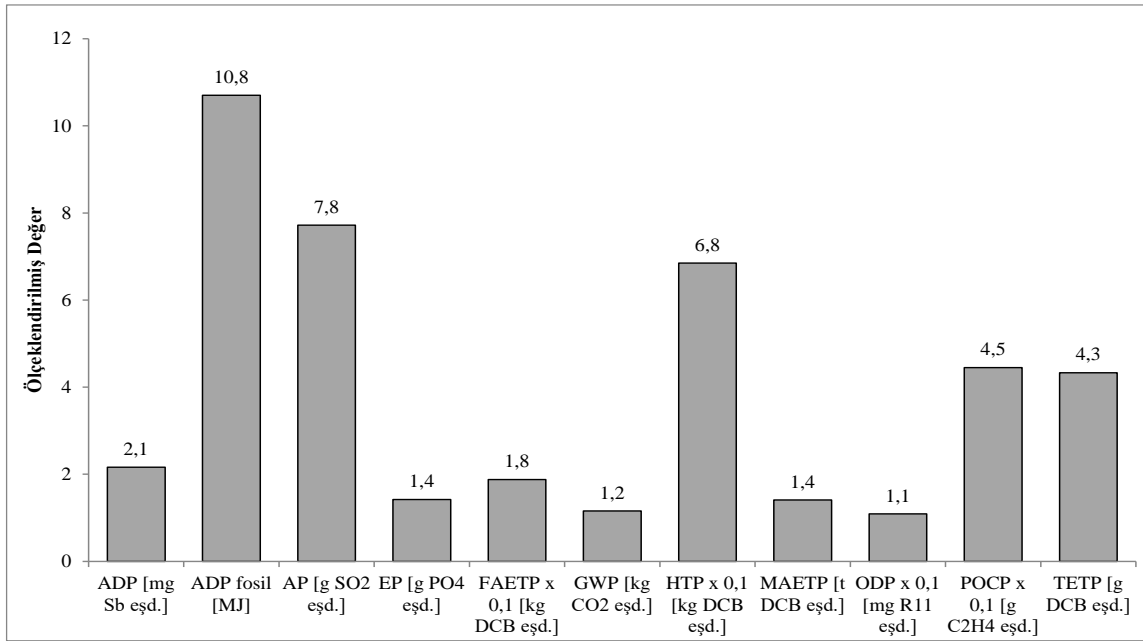
Yapılan çalışmada GaBi ts v9.2 [16] yazılımı kullanılarak cam şişe için yaşam döngüsü modellemesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar detaylı olarak açıklanarak benzer çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

A. Etki Analizi

Etki analizi basamağında cam üretim YDA çalışmasının çevresel etki sonuçları CML 2001 metodu [17] ile hesaplanmıştır. Çalışmada 11 adet çevresel etki kategorisi değerlendirilmiştir: abiyotik kaynakların tükenmesi fosil olmayan (ADP), abiyotik kaynakların tükenmesi fosil (ADP fosil), asidifikasyon potansiyeli (AP), ötrofikasyon potansiyeli (EP), tatlı su ekotoksitesitesi potansiyeli (FAETP), küresel ısınma potansiyeli (GWP), insan toksisitesi potansiyeli (HTP), deniz suyu ekotoksitesitesi potansiyeli (MAETP), ozon tabakası tükenmesi potansiyeli (ODP), fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (POCP), kara ekotoksitesitesi potansiyeli (TETP).

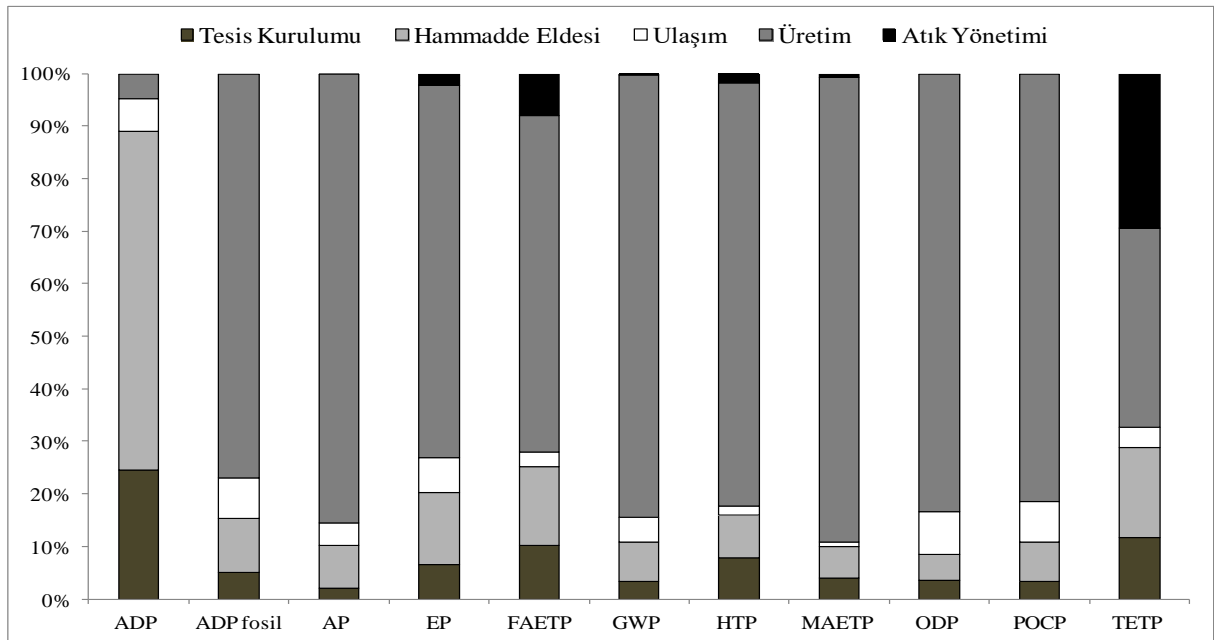
Yapılan çalışmada hesaplanan çevresel etki kategorileri, yaşam döngüsü analizi sonuçlarının daha kolay anlaşılabilmesi için oluşturulan modelde tesis kurulumu, ham madde temini, ham madde nakliyesi, cam üretim ve tesis atık yönetimi basamaklarını içine alan cam ambalaj üretimi toplam çevresel etki değerleri sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Cam ambalaj için tesis kurulumu, ham maddelerin elde ve işlenmesi, ham madde ulaşımı, cam ambalaj üretimi ve tesis atık yönetimi aşamalarında açığa çıkan çevresel etkiler Şekil 3'te gösterilmiştir. Çalışma kapsamında cam içecek ambalaj için hesaplanan her bir çevresel etki kategorisi ve bu çevresel etkilerin kaynağı olan yaşam döngüsü basamakları aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.Cam şişe için yaşam döngüsü çevresel etkiler

(Etkiler ölçeklendirilmiştir ve çalışmanın fonksiyonel birimine göre hesaplanmıştır. ADP: Abiyotik kaynakların tükenmesi fosil olmayan, ADP fosil: Abiyotik kaynakların tükenmesi fosil, AP: Asidifikasyon potansiyeli, EP: Ötrofikasyon potansiyeli, FAETP: Tatlı su ekotoksitesitesi potansiyeli, GWP: Küresel ısınma potansiyeli, HTP: İnsan toksisitesi potansiyeli, MAETP: Deniz suyu ekotoksitesitesi potansiyeli, ODP: Ozon tabakası tükenmesi potansiyeli, POCP: Fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli, TETP: Kara ekotoksitesitesi potansiyeli)



Şekil 3.Cam şişe için karbon ayak izinin yaşam döngüsü basamaklarına göre dağılımı

1) *Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli (ADP)*: Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli antimon (Sb) eşdeğeri (eşd.) olarak ifade edilir ve sistemin yaşam döngüsü boyunca sebep olduğu doğal ham madde tüketimi sonucunu verir. Belirlenen özellikteki 1 kg'lık cam şişe elde edilmesi toplam 2,1 mg Sb eşd. etkiye

sebeptir. Şekil 3'te görüldüğü gibi cam şişe yaşam döngüsünde ham madde elde edilmesi ve işlenmesi prosesi (%64) abiyotik kaynakların tükenmesine en çok etki eden basamaktır. Bunu %25'lik pay ile tesis kurulumu basamağı takip etmektedir.

2) *Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli Fosil (ADP fosil)*: Bu etki kategorisi yaşam döngüsü basamakları tarafından kullanılan fosil yakıtların etkisini ifade eder ve MJ referans birimi ile verilir. Şekil 2'de gösterildiği gibi cam şişe üretiminin toplam abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli 10,8 MJ/kg cam şişe olarak bulunmuştur. Yaşam döngüsü basamakları tarafından tüketilen doğal gazın abiyotik kaynak tüketimine etkisi %60 olarak belirlenmiştir. Bunu ham petrol (%18), taş kömürü (%12) ve linyit (%10) takip etmektedir.

3) *Asidifikasyon Potansiyeli (AP)*: Asidifikasyon potansiyeli sülfür dioksit (SO₂), amonyak (NH₃), azot oksitler (NO_x) gibi asitli gazların atmosferdeki su ile etkileşime girmesi sonucu asit yağmurları oluşturması potansiyelidir ve SO₂ eşd. olarak ifade edilir. Toplam asidifikasyon potansiyeli 7,8 g SO₂ eşd./kg cam şişe olarak bulunmuştur (Şekil 2). Bu çevresel etki kategorisine sırasıyla SO₂ (%73) ve azot monoksit (NO) (%23) neden olmaktadır. Üretim prosesi, bu etkinin toplam %85'lik kısmını oluşturmaktadır. Bunu %8'lik pay ile ham madde elde edilmesi ve işlenmesi basamağı takip etmektedir.

4) *Ötrofikasyon Potansiyeli (EP)*: Ötrofikasyon, canlılara zarar veren, ekosistemde hızlı biyokütle artışına yol açan bir kimyasal besin konsantrasyonunun birikmesidir. Bu etki kategorisi fosfat (PO₄) eşd. olarak ifade edilir. Cam şişe üretiminde 1 kg'lık ürün için 1,4 g PO₄ eşd. olarak hesaplanan toplam ötrofikasyon değerinin Şekil 3'te gösterildiği gibi %71'lik kısmı cam üretim prosesinden kaynaklanmaktadır. Ham madde elde edilmesi ve işlenmesi, ham madde ulaşımı ve tesis kurulumunun ötrofikasyon etkisi üzerindeki payları sırasıyla %13, %7 ve %6'dır.

5) *Tatlı Su Ekotoksitesisi Potansiyeli (FAETP)*: Bu çevresel etki kullanılan kimyasalların nehirler ve göller gibi tatlı su kaynaklarındaki ekosisteme verdikleri zararı ölçmektedir ve 1,4-diklorobenzen (DCB) eşd. olarak ifade edilmektedir. Cam şişe yaşam döngüsünde bu etki Şekil 2'de belirtildiği gibi toplam 0,2 kg DCB eşd./kg cam şişe olarak bulunmuştur. Bu etkinin %65'i cam üretimi, %15'i ham madde elde edilmesi ve işlenmesi, %10'u tesis kurulumu ve %8'i atık yönetimi basamağından kaynaklanmaktadır (Şekil 3).

6) *Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)*: Küresel ısınma potansiyeli, sera gazlarının oluşturduğu sera etkisinden kaynaklanan sıcaklıktaki değişim olarak tanımlanabilir. Bu etki karbondioksit (CO₂) eşd. olarak ifade edilir. Çalışmamızda cam üretim prosesinden kaynaklanan toplam GWP 1,2 kg CO₂ eşd./kg cam şişe olarak bulunmuştur. Bu etkiye %93 oranında CO₂ emisyonları ve %6 oranında metan (CH₄) emisyonları sebep olmaktadır. Şekil 3'te gösterildiği gibi küresel ısınma potansiyeline %84'lük değer ile cam ambalaj üretim prosesi en büyük paya sahibidir. Üretim basamakları içerisinde en büyük etki, tüm yaşam döngüsü basamaklarında kullanılan toplam enerjinin yaklaşık %80'lik kısmının kullanıldığı fırın basamağından kaynaklanmaktadır.

7) *İnsan Toksisitesisi Potansiyeli (HTP)*: Bu etki kategorisi çevreye salınan birçok kimyasalın, özellikle ağır metallerin, yüksek konsantrasyonlarda havaya ve suya salınmasının insanlar üzerindeki toksik etkisinin potansiyelidir ve DCB eşd. olarak ifade edilir. 1 kg'lık cam şişe üretiminin toplam insan toksisitesisi potansiyeli 0,7 kg DCB eşd. olarak bulunmuştur. Şekil 3'te gösterildiği gibi cam üretimi basamağı %81 ile bu etkiye en büyük katkıda bulunurken, ham madde elde edilmesi (%8) ve ulaşımı (%8) bu çevresel etki kategorisine aynı oranda etki etmektedir.

8) *Deniz Suyu Ekotoksitesisi Potansiyeli (MAETP)*: Deniz suyu ekotoksitesisi potansiyeli salınan kimyasalların deniz ve okyanus ekosistemlerine verdiği zararı ölçmektedir. Bu etki kategorisi DCB eşd. olarak verilmektedir. Toplam MAETP değeri 1,4 t DCB eşd./kg cam şişe olarak hesaplanmıştır (Şekil 2). Cam üretimi, %81 ile deniz sularına olan toksisiteye en fazla etki eden yaşam döngüsü basamağı olarak bulunmuştur. Üretim proseslerinden en fazla etki camın ergitildiği fırınlama basamağından gelmektedir. Deniz sularına olan bu toksik etki başlıca suya berilyum (Be) salınımından kaynaklanmaktadır.

9) *Ozon Tabakasının Tükenmesi Potansiyeli (ODP)*: Bu etki kategorisi kloroflorokarbonlar gibi bazı kimyasalların Güneş'in zararlı ışınlarından koruma özelliği olan ozon tabakasına zarar verme potansiyelini değerlendirir. Ozon tabakasının tükenme potansiyeli trikloroflorometan (R11) eşd. olarak ifade edilmektedir. Cam şişe üretimi için toplam 0,1 mg R11 eşd./kg cam şişe olarak hesaplanmıştır. Bu etkinin büyük bir kısmı (%83)

enerji yoğun bir süreç olan cam üretim basamağından kaynaklanmaktadır (Şekil 3). Doğalgazın taşınması sırasında soğutucu gaz kullanılmasından dolayı ortaya çıkan halojenli gazların ODP üzerinde büyük etkisi vardır.

10) *Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli (POCP)*: POCP insan sağlığına ve ekosisteme zarar veren reaktif maddelerin (özellikle ozon) oluşumu potansiyelidir. Bu etki kategorisi etilen (C₂H₄) eşd. olarak ifade edilmektedir. Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterildiği gibi cam şişe üretimi için hesaplanan toplam 0,45 g C₂H₄ eşd. olan bu etkinin %81'lik kısmı cam üretimi basamağından gelirken bunu ham madde elde edilmesi ve hazırlanması (%8) ve ham madde ulaşımı (%7) basamakları takip etmektedir. Cam ısıtma ve ergitme prosesleri sırasında havaya salınan SO₂ (%51) ve NO_x (%22) cam şişe üretiminde bu etkiye sebep olan başlıca emisyonlardır.

11) *Kara Ekotoksitesi Potansiyeli (TETP)*: Kara ekotoksitesi potansiyeli kimyasal salınımı sonucunda kara ekosistemleri ve karasal organizmalar üzerindeki toksik etki potansiyelidir. Bu çevresel etki kategorisi DCB eşd. olarak verilmektedir. Cam üretim sürecinin yaşam döngüsü boyutunda toplam TETP değeri 4,3 g DCB eşd./kg cam olarak bulunmuştur (Şekil 2). Cam üretimi (%38) kara ekotoksite etki kategorisine en fazla etki eden yaşam döngüsü basamağı olarak bulunmuştur. Bunu atık yönetimi (%29), ham madde elde edilmesi (%17) ve tesis kurulumu (%12) basamakları takip etmektedir. Üretim proseslerinden en fazla etki camın ergitildiği fırın basamağından gelmektedir.

B. Sonuçların Karşılaştırılması

Literatürde düz cam, ambalaj camı ve borlu cam gibi farklı cam türleri için yaşam döngüsü analizi çevresel etki çalışmaları mevcuttur [7-9, 23-31]. Literatürde bulunan bu çalışmalarda genel olarak farklı fonksiyonel birim kullanılmıştır. Çalışmamızda fonksiyonel birim 1 kg bitmiş cam şişe üretimi olarak alınmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ambalaj üretimi için kullanılan aynı sistem sınırları ve benzer fonksiyonel birim için çalışan ve CML 2001 etki kategorisini kullanan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır ve sonuçların genel olarak bu çalışmalardaki sonuçlarla elde edilen aralıkta olduğu görülmüştür. Örnek olarak 1 kg cam şişe üretimi için küresel ısınma potansiyeli en düşük 0,5 kg CO₂ eşd. [19] ve en yüksek 1,3 kg CO₂ eşd. [8] olarak literatürde bulunmuştur. Bizim bu çevresel etki kategorisi için bulduğumuz değer 1,2 kg CO₂ eşd./1 kg cam şişedir ve literatürden elde edilen aralık içerisinde yer almaktadır. Sonuçlardaki farklılık değişik ham madde türü ve miktarı, farklı geri dönüşüm oranı ve ülkelere göre değişen enerji verilerinden kaynaklanmaktadır.

IV.SONUÇLAR

Ambalaj malzemelerinin tüketimi küresel boyutta hızla artmaktadır. Ambalaj malzemeleri hemen hemen tüm faaliyet alanlarında kullanılırken birçok endüstri kolu için ise temel ihtiyaç haline gelmiştir. Bu nedenle, ambalaj malzemelerinin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek ve çevre üzerindeki zararlı etkilerini önemli ölçüde azaltmak üretim sektörünün sürdürülebilirliği için çok önemlidir.

Yapılan bu çalışma kapsamında içecek sektöründe kullanılan cam ambalaj için fabrika kurulumu, ham madde elde edilmesi ve işlenmesi, ulaşım, üretim ve atık aşamalarında oluşan yani yaşam döngüsündeki çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Yaşam döngüsü analizi uluslararası standartlar olan ISO 14040 ve ISO 14044 serisi standartlarına göre uygulanmıştır. CML 2001 etki değerlendirme yöntemi kullanılarak on bir adet çevresel etki kategorisi hesaplanmıştır.

Çalışmamızda 1 kg cam şişe üretiminin küresel ısınma potansiyeli 1,2 kg CO₂ eşd. olarak bulunmuştur. Cam şişenin yaşam döngüsü karbon ayak izlerinin yaklaşık olarak %84'ü üretim, %7'i ham madde elde edilmesinden, %5'i taşımacılıktan, %3'ü tesis kurulumu ve kalan kısmının da tesis atık yönetimi basamağından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Hesaplanan çevresel etkiler incelendiğinde en fazla etkinin geldiği yaşam döngüsü basamağının enerji yoğunluğundan dolayı genellikle cam üretimi basamağı (ADP için %4,6-MAETP için %89,0) olduğu görülmüştür.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre cam ergitme prosesi için enerji verimliliği çalışması yapılması çevresel etkilerde büyük oranda azalma sağlayacaktır. Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji tüketiminin teşvik edilmesi de sürdürülebilir cam ambalaj üretimi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca cam üretim prosesi ham

madde yoğun bir prostedir. Harman içerisindeki atık cam oranının arttırılması ile çevresel etkilerde iyileştirme sağlanabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje: 2017-02.BŞEÜ.03-04) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Üçüncü, M., *Gıdaların Ambalajlanması*. 2000, İzmir: Ege Üniversitesi Basımevi.
- [2] Bansal, N.P. and R.H. Doremus, *Handbook of Glass Properties*. 2013: Elsevier.
- [3] PAGEV, *Türkiye Plastik Ambalaj Malzemeleri Sektör Raporu*, Türk Plastik Sanayicileri Araştırma, Geliştirme ve Eğitim Vakfı, 2016.
- [4] Scalet, B.M et. all, *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU, JRC Reference Report; European Union. 2013, Luxembourg.*
- [5] Simon, B., M.B. Amor, and R. Földényi, *Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: Focus on the collection of post-consumer bottles*. Journal of Cleaner Production, 2016. 112 (Part 1): p. 238-248.
- [6] UNILEVER, *Sustainable Packaging?* 2009, The Netherlands.
- [7] Bettens, F. and R. Bagard, *Life Cycle Assessment of Container Glass in Europe*. European Container Glass Federation, 2016.
- [8] Cattaneo, J.J., *Environmental Overview*. Complete Life Cycle Assessment of North American Container Glass, 2010.
- [9] Doublet, G., *LCA of Rivella and Michel soft drinks packaging*. Institute of Environmental Engineering (IFU), Chair of Ecological System Design (ESD). 2012, Zürich.
- [10] Yay, A.S.E., *Yaşam döngüsü analizinin ambalaj atıklarının yönetiminde kullanılması*. Sakarya University Journal of Science, 2017. 21(5): p. 1008-1017.
- [11] Falkenstein, E.v., F. Wellenreuther, and A. Detzel, *LCA studies comparing beverage cartons and alternative packaging: Can overall conclusions be drawn?* The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010. 15(9): p. 938-945.
- [12] Özgen, C., *Sürdürülebilirlik Kavramının Firma Stratejisi Açısından Ambalaj Tasarımına Etkilerinin İrdelenmesi*. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. 2013, İstanbul.
- [13] Baumann, H. and A.M. Tillman, *The Hitch hiker's Guide to LCA - An orientation in life cycle assessment methodology and application*. 2004.
- [14] ISO, *ISO 14044: Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. 2006, Geneva, Switzerland.
- [15] ISO, *ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. 2006, Geneva, Switzerland.
- [16] Sphera, *GaBi LCA Software and Database*, Sphera. 2020, Stuttgart, Echterdingen.
- [17] CML. *CML-IA Characterisation Factors*. [November 2010]; Available from <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>.

- [18] Ecoinvent, *Ecoinvent Database v2.2*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. 2010, St Gallen, Switzerland.
- [19] Hirschler, R., *Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper. Final report Ecoinvent data v2.0 No. 11*: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, EMPA - TSL. 2007, Dübendorf.
- [20] Atilgan, B. and A. Azapagic, *Assessing the Environmental Sustainability of Electricity Generation in Turkey on a Life Cycle Basis*. *Energies*, 2016. 9(1): p. 31.
- [21] TEIAS. *Electricity Generation and Transmission Statistics of Turkey*. 2019; Available from <http://www.teias.gov.tr/TurkiyeElektrikIstatistikleri.aspx>.
- [22] BOTAS, *Natural Gas / Crude Oil Report*. Petroleum Pipeline Corporation. 2019, Ankara.
- [23] Mata, T.M. and C.A.V. Costa, *Life cycle assessment of different reuse percentages for glass beer bottles*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2001. 6(5): p. 307-319.
- [24] Rajat, N., *Life cycle assessment on the aluminium can and glass bottle for packaging of 500 ml beer in UCD School of Biosystems and Food Engineering*. University College Dublin. 2016, Dublin, Ireland.
- [25] Vinci, G., et al., *A sustainable innovation in the Italian glass production: LCA and Eco-Care matrix evaluation*. *Journal of Cleaner Production*, 2019. 223: p. 587-595.
- [26] Usbeck, V.C., J. Pflieger, and T. Sun, *Life Cycle Assessment of Float Glass*, in *Glass for Europe*. 2011: P. International.
- [27] AIGMF, *Life Cycle Assessment of "Container Glass and Comparison with Alternate Packaging Mediums (PET, Beverage Carton, Aluminum Can and Pouch)"* The All India Glass Manufacturers' Federation (AIGMF), 2016: New Delhi.
- [28] Glass Fibre Europe, *Life cycle assessment of CFGF – Continuous Filament Glass Fibre Products*, 2016.
- [29] Humbert, S., et al., *Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots*. 2009. 14(2): p. 95-106.
- [30] Accorsi, R., L. Versari, and R.J.S. Manzini, *Glass vs. plastic: Life cycle assessment of extra-virgin olive oil bottles across global supply chains*. 2015. 7(3): p. 2818-2840.
- [31] Larsen, A.W., H. Merrild, and T.H. Christensen, *Recycling of glass: accounting of greenhouse gases and global warming contributions*. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 2009. 27(8): p. 754-762.

Araştırma Makalesi – Research Article

Kargı ve Osmancık Çevresindeki Yayla Topraklarının Aktinomiset Çeşitliliği

Demet Tatar^{1*}, Aysel Veyisoğlu²

Geliş / Received: 11/05/2020

Revize / Revised: 04/09/2020

Kabul / Accepted: 15/09/2020

ÖZ

Bu çalışmada Çorum iline bağlı Kargı (Eğinönü), Abdullah ve Osmancık-Başpınar Karaca yaylalarından alınan toprak örneklerinden izole edilen aktinomiset suşlarının 16S rRNA gen bölgesi analizlerine göre aktinomiset çeşitliliğinin saptanması amaçlandı. Dilüsyon plak tekniğinin uygulandığı izolasyon çalışmasında 5 farklı seçici besiyeri kullanıldı. İzolatların beş farklı kültür ortamında kültürel karakterizasyonları yapıldı. Test izolatlarının 16S rRNA gen bölgesinin PZR amplifikasyonu 27F ve 1525R primerleri ile gerçekleştirildi. Filogenetik ağaçlar, MEGA 7.0 yazılım programında neighbor-joining algoritmasıyla oluşturuldu. 5 farklı izolasyon besiyerinden toplam 15 mikroorganizma seçildi ve 16S rRNA gen dizi analizine göre 15 izolatın, altısı *Nocardia* cinsi üyesi, beşi *Streptomyces* cinsi üyesi, biri *Haloactinopolyspora* cinsi üyesi, biri *Micromonospora* cinsi üyesi, biri *Nocardiopsis* cinsi üyesi ve birinin de *Rhodococcus* cinsi üyesi olduğu tespit edildi.

Anahtar Kelimeler- Aktinomiset, Çeşitlilik, Yayla Toprağı, 16S rRNA Geni

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: demettatar@hitit.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9317-3263>)

Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Hitit Üniversitesi, Osmancık Ömer Derindere Meslek Yüksekokulu, 19500, Çorum

²İletişim: aveyisoglu@sinop.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1406-5513>)

Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Sinop Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, 57000, Sinop

Actinomycetes Diversity of Plateau Soils Near Kargı and Osmancık

ABSTRACT

In this study, it was aimed to determine the diversity of actinomycetes according to 16S rRNA analysis of actinomycete isolates obtained from soil samples taken from Kargı (Eğinönü), Abdullah and Osmancık-Başpınar Karaca plateaus in Çorum Province. The isolates obtained were isolated using a dilution plate technique on 5 different selective media. Cultural characterizations of the isolates were carried out in five different culture media. PCR amplification belonging to 16S rRNA gene region of the isolates was realized out with primers of 27F and 1525R. Phylogenetic trees were formed with the neighbor-joining algorithm in MEGA 7.0 software. A total of 15 microorganisms were selected from 5 different isolation media and according to 16S rRNA gene sequence analysis of 15 isolates, six *Nocardia* isolates, five *Streptomyces* isolates, one *Haloactinopolyspora* isolate, one *Micromonospora* isolate, one *Nocardiopsis* isolate and one *Rhodococcus* isolate were determined.

Keywords- *Actinomycete, Diversity, Plateau Soil, 16S rRNA Gene*

I.GİRİŞ

Aktinomisetler, Actinobacteria filumu ve Actinomycetales ordosuna ait olan filamentöz bakterilerdir. Aktinomisetler, özellikle antibiyotik bileşikler açısından çok sayıda biyoaktif molekül üretme kabiliyetleri nedeniyle tıbbi ve biyoteknoloji endüstrilerindeki en paha biçilmez prokaryotlar olarak kabul edilmektedir. Aktinomisetler içerisinde *Streptomyces* cinsinin antibiyotiklerin % 60'ının üretiminden sorumlu olduğu düşünülmektedir [1-3].

Aktinomisete olan ilgi, temel olarak bazı vitaminler ve enzimlerle birlikte antibiyotik oluşturma yeteneklerine bağlı olarak artmaktadır. 1940 yılında aktinomisin'in keşfi ile başlayan ve devamında aktinomisetler tarafından sentezlenen antibiyotiklere karşı mükemmel bir ilgi ortaya çıkmıştır [4]. Streptotirisin, streptomisin, kloramfenikol, tetrasiklinler, eritromisinler, neomisin, novobiosin, oleandomisin, nistatin gibi çok sayıda antibiyotiklerin keşfi gerçekleştirilmiştir. Antibiyotiklerin keşfi ile ilgili bu eğilim yirmi birinci yüzyılda bile daptomisin, epirubisin, karbapenem analogları, thienamisin gibi yeni antibiyotiklerin eklenmesiyle devam etmektedir [5].

Actinobacteria'lar genomlarında yüksek G+C içeriğine sahip gram-pozitif filamentöz bakterilerdir. Actinobacteria'ların çoğunluğu hem karasal hem de akuatik ekosistemlerde geniş oranda dağılım gösteren serbest yaşayan organizmalardır [6].

Topraktan elde edilen en iyi bilinen aktinomisetler, *Streptomyces* cinsine ait türlerdir. Bunun yanı sıra *Nocardia*, *Micromonospora*, *Micromonospora*, *Actinomyces*, *Actinoplanes* and *Streptosporangium* cinslerine ait türlerde topraktan izole edilmişlerdir [7].

Çin'de Tibet platosu üzerindeki Qinghai yaylasında yer alan toprak örneğinden selülozu parçalama özelliği olan aktinomisetler ile ilgili bir çalışma gerçekleştirilmiştir [8]. Farklı bir çalışmada, İç Moğolistan'daki bir yayladan elde edilen topraklarda fungus ve aktinomiset çeşitliliği araştırılmıştır [9]. Orta Afrika Cumhuriyetindeki Bangui yaylasından yeni bir aktinomiset olan *Kibdelosporangium banguiense* elde edilerek tanımlanmıştır [10]. Türkiye'de yapılan bir çalışmada ise Doğu Karadeniz Bölgesinden alınan farklı yayla topraklarından farklı aktinomisetlerin izolasyonu ve filogenetik analizi gerçekleştirilmiştir [11].

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki Kargı (Eğinönü), Abdullah ve Osmancık-Başpınar Karaca yaylalarından alınan toprak örneklerinden aktinomiset izolasyonunun gerçekleştirilmesi, izole edilen aktinomisetlerin 16S rRNA sekans analizi yapılarak ait olduğu cinslerin belirlenmesi ve böylece aktinomiset çeşitliliğinin belirlenmesidir.

II.MATERYAL VE METOT

A. Toprak Örneklerinin Toplanması ve Saklanması

Kargı (Eğinönü), Abdullah ve Osmancık Başpınar-Karaca yaylalarından toprak örnekleri alındı. Bu örnekler laboratuvara getirilerek izolasyonun yapılacağı tarihe kadar +4°C' de saklandı.

B. Aktinomiset İzolasyonu

Aktinomisetlerin izolasyonu için dilüsyon plak tekniği kullanılmıştır. Toprak örneklerinden 1 gr tartılıp içerisine cam boncuklar yerleştirilen 9 ml steril Ringer çözeltisi bulunan şişelere konuldu. Bu şekilde her bir toprak örneği için hazırlanan 10^{-1} 'lik solüsyonlar toprak kolloidlerine tutunmuş olan aktinomisetlerin sporlarını ve misellerini kolloidlerden ayırmak için 45 dakika süre ile hafifçe çalkalandı. Daha sonra bu 10^{-1} dilüsyonlar vejetatif formlarının neden olabileceği kontaminasyonları azaltmak amacıyla 55°C'ye ayarlanmış su banyosunda 30 dakika bekletildi ve her bir toprak örneğinin 10^{-1} dilüsyonları, vorteks karıştırıcı ile karıştırılarak homojen hale getirildi. Otomatik pipet ile aseptik şartlarda 1 ml alınarak içerisinde 9 ml steril ringer çözeltisi bulunan cam tüplere konularak bu şekilde 10^{-2} 'lik toprak ve sediment dilüsyonları elde edildi. 10^{-1} ve 10^{-2} 'lik dilüsyonların her birinden otomatik pipet ile 0.1 ml toprak ve sediment solüsyonları alınıp, seçici izolasyon plaklarının yüzeylerine konularak steril özeyle yayma plak yöntemi ile inoküle edildi (Tablo 1). Her bir dilüsyon için 3 plak hazırlandı ve 28°C' de 21-30 gün süreyle inkübasyona bırakıldı.

Tablo 1. Kullanılan seçici besiyerlerin listesi

No	Besiyeri	Antibiyotik	Referanslar
1	Humik Asit-Vitamin Agar	Sikloheksimid (50 µg/ml) Nalidiksik asit (10 µg/ml)	[12]
2	Niştasta Kazein Agar	Sikloheksimid (50 µg/ml) Rifampisin (5µg/ml)	[13]
3	Modifiye Bennett's Agar	Sikloheksimid (50 µg/ml) Rifampisin (5µg/ml)	[14]
4	NZ-Amin Agar	Sikloheksimid (50 µg/ml)	[15]
5	Gliserol Asparajin Agar-ISP 5	Sikloheksimid (50 µg/ml) Nalidiksik asit (10 µg/ml)	[16]

C. İzolatların Seçimi, Saflaştırılması ve Stoklanması

Seçici besiyerlerinde 21-30 gün inkübasyona bırakılan izolasyon plaklarından aktinomiset suşları koloni morfolojileri dikkate alınarak seçildi. Seçilen suşlar sikloheksimid (50 µg/ml) ilaveli arpa-maya ekstraktları (ISP2) [16] yüzeyine tek koloni düşmesi için çizgi ekim yöntemiyle inoküle edilerek 28°C'de 20 gün inkübasyona bırakıldı. Koloni morfolojisi dikkate alınarak seçilen izolatlar numaralandırılıp saf kültürleri yapılarak % 25 gliserol içeren otoklavlanmış vidalı kapaklı tüplere steril kürdan yardımıyla transfer edilerek -80°C'de stoklandı.

D. İzolatların Kültürel Özellikleri

İzolatların International *Streptomyces* Project (ISP 2-6)[16] besi ortamlarındaki gelişimleri 28 °C sıcaklıkta 10 günlük inkübasyon süresi sonunda değerlendirildi. İzolatların besi ortamlarında, gelişim, spor rengi, hava misel rengi ve çözünür pigment rengi gibi özellikleri Kelly (1964) [17] tarafından önerilen ISCC-NBS renk kataloğu kullanılarak belirlendi.

E. Genomik DNA İzolasyonu

16S rRNA geni ile ilgili PZR çalışmaları için test organizmalarının bazılarının genomik DNA'ları Pitcher vd., [18] tarafından tanımlanan "Guanidin thiosiyanat DNA izolasyon" metoduna ve bazılarının ise Purelink Invitrogen genomik DNA izolasyon kitine göre yapıldı.

F. 16S rRNA Gen Bölgesinin Amplifikasyonu

Her PZR karışımı (50 µl), primerleri (20 µM), Taq polimeraz tamponunu (HotStarTaq®) ve deoksiniükleosid trifosfat karışımını (Promega) (25 µM) içermektedir. Çözeltiyeye Taq polimeraz (2.5 U, HotStarTaq®) ve kromozomal DNA (50-300 ng) ilave edildi. 16S rRNA genleri, spesifik primerler 27F ve 1525R ile amplifiye edildi. DNA termal cyclus PZR amplifikasyonu için kullanıldı. PZR koşulları 95 ° C'de (5 dk) ilk denatürasyon basamağı 1 döngü, 95 ° C'de (1 dk) denatürasyon, 55 ° C (2 dk) bağlanma ve 72 ° C'de (3 dk) uzama basamağı 35 döngü olacak şekilde ve 72 ° C'de son bir uzama basamağından oluşmaktadır (10 dakika). Daha sonra PZR ürünleri, % 1,5 agaroz (Merck) jel içerisinde elektroforez kullanılarak yürütüldü ve Gene Genius Bioimaging görüntüleme sistemi ile görüntülendi.

G. 16S rRNA Geni Dizi Analizi ve Filogenetik Dendogramın Oluşturulması

16S rRNA gen bölgesi PZR amplifikasyonları gerçekleştirilen örnekler QIAquick PZR Pürifikasyon Kiti ile saflaştırıldıktan sonra 5 primer ile dizi analizi yapıldı (Tablo 2). İzolatların 16S rRNA gen bölgesi sekans analizi tamamlandıktan sonra elde edilen dizi verisi ChromasPro 1.7.5 programı ile birleştirildi ve Etaxon Server (<http://ezbiocloud.net>) [19] kullanılarak, uluslararası veri tabanlarındaki en yakın akraba türlerin dizi verileri ile karşılaştırıldı ve % benzerlikleri belirlendi. Filogenetik analizler için MEGA 7.0 programı, hizalama için aynı programın CLUSTAL_W [20] seçeneği kullanıldı. Filogenetik dendogramların çizilmesinde Neighbour-Joining [21] metodu ve Jukes-Cantor filogenetik uzaklık matrisi kullanıldı [22]. Oluşturulan filogenetik ağaçların bootstrap analizleri 1000 tekrarlı olarak yapıldı [23]

Tablo 2. 16S rRNA dizileme için kullanılan oligonükleotid primerler

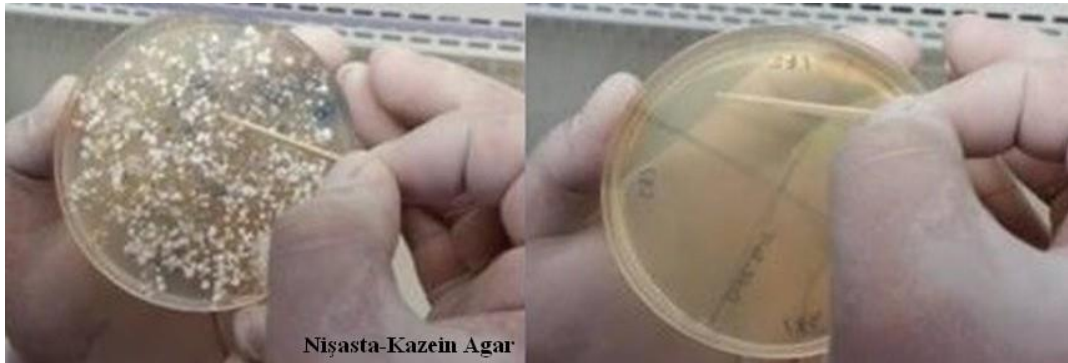
Primer Kodu	Nükleotid Dizileri (5'-3')	Uzunluk	Referanslar
27F	AGAGTTTGATCMTGGCTCAG	20	[24]
518F	CCAGCAGCCGCGGTAAT	17	[25]
800R	TACCAGGGTATCTAATCC	18	[26]
MG5F	AAACTCAAAGGAATTGACGG	20	[26]
MG6F	GACGTCAAGTCATCATGCC	19	[26]

Lane [24]: M = A:S.

III. BULGULAR

A. Aktinomiset İzolasyonu, Saflaştırılması ve Stoklanması

İzolasyon işlemi 5 farklı seçici izolasyon besiyeri kullanılarak gerçekleştirildi. İzolasyon için hazırlanan petripler 28 °C'de 21-30 gün süreyle inkübasyona bırakıldı. Nişasta Kazein Agar izolasyon petri görüntüsü Şekil 1'de gösterildi. Saflaştırılan 15 izolat, % 25'lik gliserol içeren vidalı kapaklı tüplere aktararak -80 °C'de stoklandı (Tablo 3).



Şekil 1. Abdullah yaylası toprak örneğinin izolasyonu

Tablo 3. Test izolatlarının kaynağı

Laboratuvar No	İzolatların Kaynağı
GA1AY, H2AY, GA2AY, SC1AY, NZ1AY, B1AY	Abdullah Yaylası
GA2KY, NZ1KY, SC1KY, H1KY, B2KY	Kargı (Eğünönü) Yaylası
B2BY, H1BY, SC1BY, NZ2BY	Başpınar-Karaca Yaylası

İzolatların kodları belirlenirken baştaki harfler besiyerinin ilk harflerini ifade etmektedir. Hemen ardından gelen rakam ise kaçınıcı izolat olduğunu göstermektedir. Son iki harf ise örneğin alındığı lokasyonun adıdır (Örn: GA1AY-GA: Gliserol Asparajın Agar-ISP 5, 1. İzolat, AY: Abdullah Yaylası).

B. İzolatların Kültürel Özellikleri

Hava miselyumları genellikle beyaz renkte oluşmuş olup en iyi gelişim ISP 2 ve ISP 3'de gözlemlenmiştir. GA1AY, H2AY, B2BY, NZ1KY izolatları dışında diğer tüm izolatlar tüm kültür ortamlarında iyi bir gelişim göstermiştir. GA1AY izolatının ise tüm kültür ortamlarında zayıf gelişim gösterdiği saptanmıştır (Tablo 4).

Tablo 4. İzolatların farklı besi ortamlarındaki büyüme ve kültürel özellikleri

	Karakteristik	ISP 2	ISP 3	ISP 4	ISP 5	ISP 6
1	Gelişim	Zayıf	Zayıf	Zayıf	Zayıf	Zayıf
	Spor Rengi	Yok	Krem	Yok	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Açık kahverengi	Açık kahverengi	Açık kahverengi	Kahverengi	Kahverengi
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
2	Gelişim	İyi	İyi	İyi	Zayıf	Zayıf
	Spor Rengi	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Siyah	Koyu kahverengi	Yeşilimsi siyah	Koyu turuncu	Koyu turuncu
	Çözünür pigment	Yeşilimsi siyah	Yok	Yok	Yok	Yok
3	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Yok	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Turuncu	Koyu krem	Koyu krem	Açık turuncu	Koyu turuncu
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
4	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Yok	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Turuncu	Koyu krem	Koyu krem	Açık turuncu	Koyu turuncu
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
5	Gelişim	İyi	İyi	İyi	Zayıf	Zayıf
	Spor Rengi	Yok	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Turuncu	Koyu krem	Koyu krem	Turuncu	Turuncu
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
6	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Turuncu	Açık turuncu	Açık turuncu	Turuncu	Turuncu
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
7	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Turuncu	Açık turuncu	Açık turuncu	Turuncu	Turuncu
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
8	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Krem-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Turuncu	Açık turuncu	Açık turuncu	Turuncu	Turuncu
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
9	Gelişim	İyi	İyi	Zayıf	Zayıf	Zayıf
	Spor Rengi	Yok	Beyaz	Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Beyaz	Krem	Krem	Krem	Açık sarı
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
10	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Yok	Krem	Krem	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Turuncu	Açık turuncu	Açık turuncu	Turuncu	Turuncu
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
11	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Gri	Gri-Beyaz	Gri-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Açık kahverengi	Sarı	Sarı	Kahverengi	Kahverengi
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
12	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Gri	Gri-Beyaz	Gri-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Sarı	Sarı	Açık sarı	Sarı	Sarı
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
13	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Yok	Gri-Beyaz	Gri-Beyaz	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Krem	Krem	Krem	Beyaz-Sarı	Beyaz-Sarı
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
14	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Yok	Gri-Beyaz	Gri	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Kahverengi	Kahverengi	Kahverengi	Gri	Gri
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
15	Gelişim	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
	Spor Rengi	Yok	Krem	Krem	Yok	Yok
	Substrat Miselyum	Açık sarı	Açık sarı	Açık sarı	Sarı	Sarı
	Çözünür pigment	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok

1, GA1AY; 2, H2AY; 3, GA2AY; 4, GA2KY; 5, B2BY; 6, H1BY; 7, SC1AY; 8, SC1BY; 9, NZ1KY; 10, SC1KY; 11, H1KY; 12, NZ1AY; 13, NZ2BY; 14, B1AY; 15, B2KY

C. 16S rRNA Geninin PZR Amplifikasyonu ve Filogenetik Analizi

Kargı ve Osmançık çevresindeki yayla topraklarının izole edilen ve sekans analizi tamamlanan 15 izolattan 6'sı *Nocardia* cinsi üyesi, 5'i *Streptomyces* cinsi üyesi, 1'i *Haloactinopolyspora* cinsi üyesi, 1'i *Micromonospora* cinsi üyesi, 1'i *Nocardiopsis* cinsi üyesi ve 1'inin de *Rhodococcus* cinsi üyesi olduğu tespit edildi (Tablo 5). 15 izolatın 16S rRNA gen dizileri GenBank'a depozit edildi. GenBank numaraları Tablo 5'te verilmiştir.

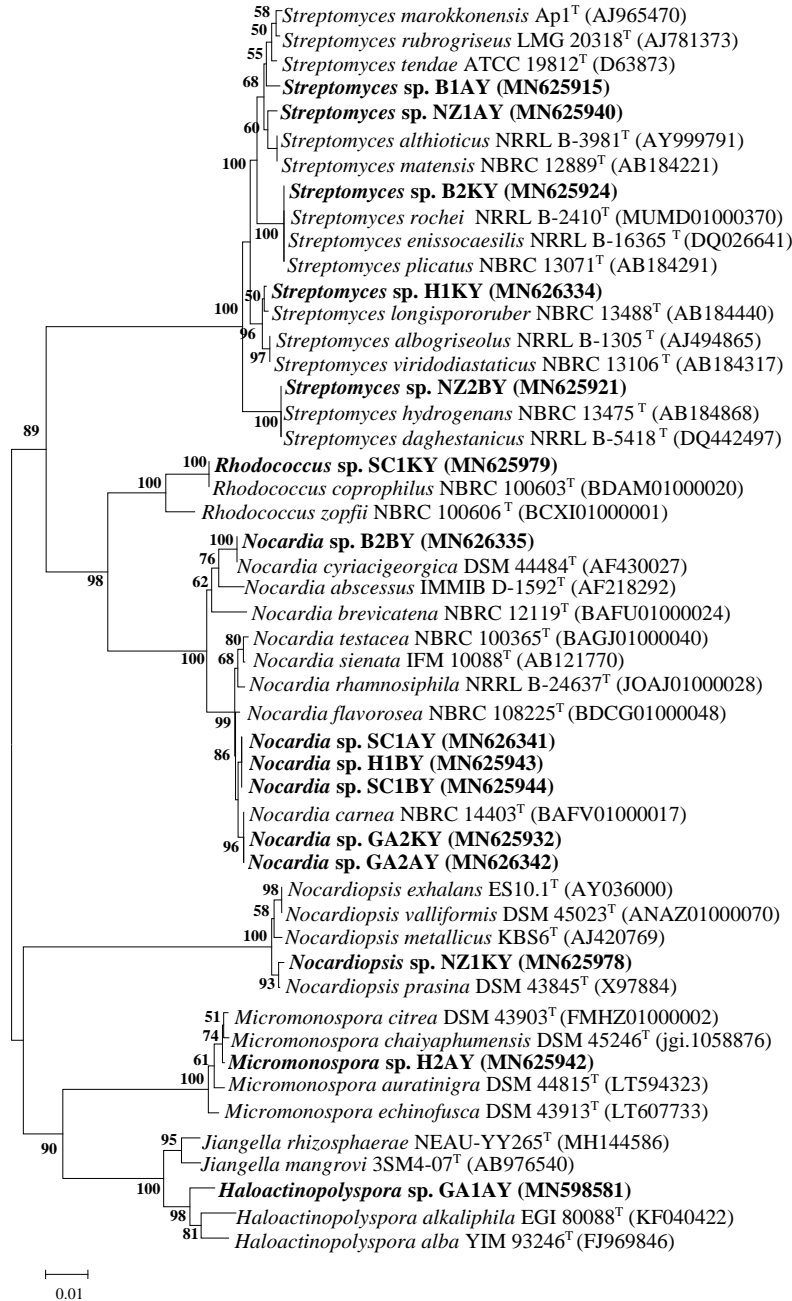
Tablo 5. 16S rRNA dizi analizi sonuçlarına göre *Actinobacteria* sınıfına ait test organizmalarının en yakın tip türleri ile olan nükleotit benzerliği

No	Suş Kodu	İzole Edildikleri Besiyeri	En Yakın Tip Türü	% Benzerlik-Nükleotit Farklılığı	GenBank No
1.	GA1AY	Gliserol Asparajin Agar-ISP 5	<i>Haloactinopolyspora alkaliphila</i> EGI 80088 ^T	% 98.41	MN598581
2.	H2AY	Humik Asit-Vitamin Agar	<i>Micromonospora citrea</i> DSM 43903 ^T	% 99.79	MN625942
3.	GA2AY	Gliserol Asparajin Agar-ISP 5	<i>Nocardia carnea</i> NBRC 14403 ^T	% 100	MN626342
4.	GA2KY	Gliserol Asparajin Agar-ISP 5	<i>Nocardia carnea</i> NBRC 14403 ^T	% 100	MN625932
5.	B2BY	Modifiye Bennett's Agar	<i>Nocardia cyriacigeorgica</i> DSM 44484 ^T	% 100	MN626335
6.	H1BY	Humik Asit-Vitamin Agar	<i>Nocardia flavorosea</i> NBRC 108225 ^T	% 99.72	MN625943
7.	SC1AY	Nişasta Kazein Agar	<i>Nocardia flavorosea</i> NBRC 108225 ^T	% 99.72	MN626341
8.	SC1BY	Nişasta Kazein Agar	<i>Nocardia flavorosea</i> NBRC 108225 ^T	% 99.72	MN625944
9.	NZ1KY	NZ-Amin Agar	<i>Nocardiopsis prasina</i> DSM 43845 ^T	% 99.86	MN625978
10.	SC1KY	Nişasta Kazein Agar	<i>Rhodococcus coprophilus</i> NBRC 100603 ^T	% 99.93	MN625979
11.	H1KY	Humik Asit-Vitamin Agar	<i>Streptomyces albogriseolus</i> NRRL B-1305 ^T	% 99.79	MN626334
12.	NZ1AY	NZ-Amin Agar	<i>Streptomyces althioticus</i> NRRL B-3981 ^T	% 99.38	MN625940
13.	NZ2BY	NZ-Amin Agar	<i>Streptomyces hydrogenans</i> NBRC 13475 ^T	% 100	MN625921
14.	B1AY	Modifiye Bennett's Agar	<i>Streptomyces marokkonensis</i> Ap1 ^T	% 99.38	MN625915
15.	B2KY	Modifiye Bennett's Agar	<i>Streptomyces rochei</i> NRRL B-2410 ^T	% 100	MN625924

D. 16S rRNA Genine Dayalı Filogenetik Analiz

16S rRNA gen bölgesi nükleotit dizi analizlerine göre *Haloactinopolyspora* cinsine ait GA1AY izolatu *Haloactinopolyspora alkaliphila* EGI 80088^T ve *Haloactinopolyspora alba* YIM 93246^T tip türlerine sırasıyla % 98.41 ve % 97.96 benzerlik göstermektedir. Filogenetik dendogramda ise GA1AY izolatu, *Haloactinopolyspora alkaliphila* EGI 80088^T ve *Haloactinopolyspora alba* YIM 93246^T tip türleri ile birlikte kümelenmiştir. *Micromonospora* cinsi üyesi olan H2AY izolatu, en yakın akraba türleri olan *Micromonospora citrea* DSM 43903^T ve *Micromonospora chaiyaphumensis* DSM 45246^T ile sırasıyla % 99.79 ve % 99.58 benzerlik göstermektedir. 16S rRNA gen bölgesi dizi analizlerine bağlı filogenetik dendograma göre *Micromonospora* cinsine ait H2AY izolatu *Micromonospora citrea* DSM 43903^T ve *Micromonospora chaiyaphumensis* DSM 45246^T tip türleriyle beraber kümelenmiştir. 16S rRNA gen bölgesi nükleotit dizi analizlerine göre *Nocardia* cinsine ait GA2AY ve GA2KY izolatlarının her ikisi de, *Nocardia carnea* NBRC 14403^T türü ile % 100'lük bir benzerlik göstermektedir. 16S rRNA gen bölgesi nükleotit dizi analizlerine dayalı filogenetik dendograma göre *Nocardia* cinsine ait GA2AY ve GA2KY izolatları, *Nocardia carnea* NBRC 14403^T türü ile birlikte kümelenmiştir. *Nocardia* cinsine ait B2BY izolatu *Nocardia cyriacigeorgica* DSM 44484^T ile % 100'lük bir benzerliğe sahip olup aynı zamanda filogenetik dendogramda birlikte kümelenmiştir. 16S rRNA gen bölgesi nükleotit dizi analizlerine göre *Nocardia* cinsine ait H1BY, SC1AY ve SC1BY izolatlarının hepsi *Nocardia flavorosea* NBRC 108225^T ile % 99.72 benzerlik göstermektedir. Filogenetik dendogramda H1BY, SC1AY ve SC1BY izolatlarının üçü birlikte kümelenmiştir. *Nocardiopsis* cinsine ait NZ1KY izolatu, *Nocardiopsis prasina* DSM 43845^T ile % 99.86 benzerlik göstermektedir. NZ1KY izolatu, *Nocardiopsis prasina* DSM 43845^T ile filogenetik dendogramda birlikte kümelenmiştir. *Rhodococcus* cinsine ait SC1KY izolatu *Rhodococcus coprophilus* NBRC 100603^T tip türü ile % 99.93'lük bir benzerlik sergilemekte ve filogenetik dendogramda birlikte kümelenmektedir. 16S rRNA gen bölgesi nükleotit dizi analizlerine göre H1KY izolatu, *Streptomyces albogriseolus* NRRL B-1305^T tip türü ile % 99.79 benzerliğe sahiptir. NZ1AY izolatu, *Streptomyces althioticus* NRRL B-3981^T ile % 99.38 benzerlik göstermektedir. NZ2BY izolatu, *Streptomyces hydrogenans* NBRC 13475^T türü ile % 100 benzerlik gösterir. B1AY izolatu, *Streptomyces*

marokkonensis Ap1^T ile % 99.38'lik benzerlik göstermektedir. B2KY izolatu ise, *Streptomyces rochei* NRRL B-2410^T tip türü ile % 100 benzerliğe sahiptir (Tablo 5, Şekil 2).



Şekil 2. Sekansı yapılan tüm izolatlardan 16S rRNA dizilerine dayalı filogenetik ilişkilerini gösteren dendrogram. Neighbour-Joining algoritmasına göre çizilmiş ağaçta, % 50'nin üzerinde desteklenen dallanma noktaları için bootstrap değerleri verildi. Nükleotit pozisyon değişimi 0,01'dir.

IV. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Geleneksel mikrobiyolojik metotlara dayanarak mikroorganizmaların sınıflandırılması (morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal) mikroorganizmaların taksonomik pozisyonlarının net bir şekilde belirlenmesini sağlayamamaktadır. Bu nedenle, günümüzde polifazik taksonomi olarak adlandırılan, moleküler teknikler aracılığıyla elde edilen bilgilerle morfolojik ve biyokimyasal verilerin bir arada değerlendirildiği ileri bir yaklaşım kullanılmaya başlanmıştır [27].

5 farklı seçici izolasyon besiyeri kullanılarak elde edilen 15 izolatın 16S rRNA gen bölgesi dizi analizleri sonuçlarına göre % 40'ı *Nocardia*, % 33.3'ü *Streptomyces*, % 6.6 'sı *Haloactinopolyspora*, % 6.6'sı *Micromonospora*, % 6.6'sı *Nocardiopsis* ve % 6.6'sının da *Rhodococcus* cinsi üyesi olduğu tespit edildi.

15 İzolatın ISP 2-6 [16] kültür ortamlarındaki gelişimleri değerlendirildi. Bunun sonucunda, GA1AY izolatının tüm kültür ortamlarında zayıf gelişim gösterdiği gözlemlenirken, GA1AY, H2AY, B2BY, NZ1KY izolatları dışında diğer tüm izolatlar ISP 2-6 kültür ortamlarında iyi bir gelişim göstermiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada Çorum iline bağlı Kargı (Eğinönü), Abdullah ve Osmancık-Başpınar Karaca Yaylalarından alınan toprak örneklerinden aktinomiset izolasyonu ve filogenetik analizleri gerçekleştirilmiştir.

16S rRNA dizi analizi tamamlanan test izolatlarının filogenetik analizlerine göre en yakın akrabaları ile en fazla nükleotit farkı gösteren izolatlara öncelik verilerek moleküler, kemotaksonomik ve fenotipik analizlerin tamamlanması ve ileriki çalışmalarda literatüre kazandırılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Hitit Üniversitesi (ODMYO19003.18.001) tarafından desteklenmiştir. Çalışmaya katkılarından dolayı Prof. Dr. Nevzat Şahin'e (Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü) teşekkür ediyorum.

KAYNAKLAR

- [1] Fguira, L.F., Fotso, S., Ameer-Mehdi, R.B., Mellouli, L., & Laatsch, H. (2005). Purification and Structure Elucidation of Antifungal and Antibacterial Activities of Newly Isolated *Streptomyces* sp. Strain US80. *Research in Microbiology*, 156, (3), 341-345.
- [2] Mellouli, L., Ameer-Mehdi, R.B., Sioud, S., Mansour, S., & Bejar, S. (2003). Isolation, Purification And Partial Characterization of Antibacterial Activities Produced by A Newly Isolated *Streptomyces* sp. US24 Strain. *Research in Microbiology*, 154, (5), 345-352.
- [3] Singh, L.S., Baruah, I., & Bora, T.C. (2006). Actinomycetes of Loktak Habitat: Isolation and Screening for Antimicrobial Activities. *Biotechnology*, 5, (2), 217-221.
- [4] Cassell, G. H., & Mekalanos, J. (2001). Development of Antimicrobial Agents in The Era of New and Reemerging Infectious Diseases and Increasing Antibiotic Resistance. *JAMA*, 285, (5), 601-605.
- [5] Sivaramkrishna, H., & Girish, M. (2009). Microbes An Eternal Source of Innovative Drugs. *Express Pharma*, 16-30 June.
- [6] Macagnan, D., Romeiro, R.D.S., de Souza, J.T., & Pomella, A.W.V. (2006). Isolation of Actinomycetes and Endospore-Forming Bacteria from The Cacao Pod Surface and Their Antagonistic Activity against The Witches' Broom and Black Pod Pathogens. *Phytoparasitica*, 34, 122-132.
- [7] Arifuzzaman, M., Khatun, M.R., & Rahman, H. (2010). Isolation and Screening of Actinomycetes from Sundarbans Soil for Antibacterial Activity. *African Journal of Biotechnology*, 9, 4615-4619.
- [8] Cai, Y., Xue, Q., Chen, & Zhang, R. (2009). Study on Cellulose-decomposed Actinomycetes in Soil in the Eastern of the Qinghai Plateau. *Modern Applied Science*, 3, (2), 83-88.

- [9] Zhao, J., Shao, Y., Zhao, Z., Liu, F., Zhou, H., & Li, Z. (2011). Diversity of Fungi and Actinomycetes in Soil of Enclosed and Grazing Wetland on Inner Mongolian Plateau. *Advanced Materials Research*, Vols. 356-360, 2703-2706.
- [10] Pascual, J., González, I., Estévez, M., Benito, P., & Trujillo, M.E., et al. (2016). Description of *Kibdelosporangium banguiense* sp. nov., A Novel Actinomycete Isolated From Soil of The Forest of Pama, on The Plateau of Bangui, Central African Republic. *Antonie van Leeuwenhoek*, 109, 685-695.
- [11] Isik, K., Gencbay, T., Ozdemir-Kocak, F., & Cil, E. (2014). Molecular Identification of Different Actinomycetes Isolated from East Black Sea Region Plateau Soil by 16S rDNA Gene Sequencing. *African Journal of Microbiology Research*, 8, (9), 878-887.
- [12] Hayakawa, M., & Nonomura, H. (1987). Humic Acid-Vitamin Agar, A New Medium for The Selective Isolation of Soil Actinomycetes. *Journal of Fermentation Technology*, 65, 501-509.
- [13] Küster, E., & Williams, S.T. (1964). Selection of Media for Isolation of Streptomycetes. *Nature*, 202, 928-929.
- [14] Jones, K.L. (1949). Fresh Isolates of Actinomycetes in which The Presence of Sporogenous Aerial Mycelia is A Fluctuating Characteristic. *Journal of Bacteriology*, 57, 141-145.
- [15] Atlas, R.M. (2010). Handbook of Microbiological Media, *Fourth Edition*, 1249, CRC Press, USA.
- [16] Shirling, E. B., & Gottlieb, D. (1966). Methods for Characterization of *Streptomyces* Species. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 16, 313-340.
- [17] Kelly, K. L. (1964). Color-name charts illustrated with centroid colors. Inter-Society Color Council-National Bureau of Standards, Supplement to NBS Circ. 533, Standard sample No. 2106, Chicago.
- [18] Pitcher, D.G., Saunders, N.A., & Owen, R.J. (1989). Rapid Extraction of Bacterial Genomic DNA with Guanidium Thiocyanate. *Letters in Applied Microbiology*, 8, 151-156.
- [19] Kim, O.S., Cho, Y.J., Lee, K., Yoon, S.H., Kim, M., Na, H., Park, S.C., Jeon, Y.S., Lee, J.H., Yi, H., Won, S., & Chun, J. (2012). Introducing EzTaxon-e: A Prokaryotic 16S rRNA Gene Sequence Database with Phylotypes that Represent Uncultured Species. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 62, 716-721.
- [20] Kumar, S., Stecher, G., & Tamura, K. (2016). MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 7.0 for Bigger Datasets. *Molecular Biology and Evolution*, 33, 1870-1874.
- [21] Saitou, N., & Nei, M. (1987). The Neighbour-Joining Method: A New Method for Constructing Phylogenetic Trees. *Molecular and Biological Evolution*, 4, 406-425.
- [22] Jukes, T.H., & Cantor, C.R. (1969). Evolution of protein molecules. In *Mammalian Protein Metabolism*, 3, 21-132. Edited by H. N. Munro. New York: Academic Press.
- [23] Felsenstein, J. (1985). Confidence Limits on Phylogeny: An Approach Using The Bootstrap. *Evolution*, 39, 783-791.
- [24] Lane, D.J. (1991). 16S/23S rRNA Sequencing. In: *Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics*. Stackebrandt, E., and Goodfellow, M., eds., *John Wiley and Sons*, New York, NY, 115-175.
- [25] Buchholz-Cleven, B.E.E., Rattunde, B., & Straub, K.L. (1997). Screening for Genetic Diversity of Isolates of Anaerobic Fe(II)-Oxidizing Bacteria Using DGGE and Whole-Cell Hybridization. *Systematic and Applied Microbiology*, 20, 301-309.

- [26] Chun, J. (1995). Computer Assisted Classification and Identification of Actinomycetes. PhD thesis. Department of Microbiology, University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, UK.
- [27] Prakash O., Verma M., Sharma P., Kumar M., Kumari K., Singh A., Kumari H., Jit S., Gupta S. K., & et al. (2007). Polyphasic Approach of Bacterial Classification – An Overview of Recent Advances. *Indian Journal of Microbiology*, 47, (2), 98-108.

Araştırma Makalesi - Research Article

Çizgisel Kaynak ile Odak Dışı Beslenen Bir Parabolik Reflektörden Kırınan Alanlar

Mustafa Kara^{1*}

Geliş / Received: 11/05/2020

Revize / Revised: 01/09/2020

Kabul / Accepted: 11/09/2020

ÖZ

Bir çizgisel kaynağın bir silindirik parabolik mükemmel elektriksel iletken (MEİ) reflektör antenden kaynaklanan kırınan alanları Geliştirilmiş Fiziksel Optik'in (Modified Theory of Physical Optics; MTPO) saçınım integrali kullanılarak incelenmiştir. Reflektör, çizgisel kaynak tarafından odak-dışı olarak beslenmiştir. Köşe kırınım alanları, Köşe Noktası Metodu (Edge Point Method) kullanılarak asimptotik olarak hesaplanmıştır. Üniform kırınım alanları elde etmede kullanılan hesaplamada Signum (İşaret) ve Fresnel fonksiyonları yardımıyla üniform olmayan durum ortadan kaldırılmıştır. Toplam saçılan, kırınan ve yansıyan alanlar sayısal olarak, parabol genişliği, çizgisel kaynağın konum açısı gibi problemin bazı parametreleri için çizdirilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Çizgisel Kaynak, Parabolik Anten, Odak-Dışı Besleme, Kırınım

^{1*}Corresponding author: mustafa.kara@odu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3793-6828>)
Electronics and Automation Department, Ordu University, Technical Sciences MYO, 52200 Ordu, Turkey

Diffracted Fields by a Parabolic Reflector Offset-Fed by a Line Source

ABSTRACT

Fields of a line source diffracted by a cylindrical parabolic Perfectly Electric Conducting (PEC) reflector are investigated by employing the scattering integral of the Modified Theory of Physical Optics (MTPO). The reflector that is symmetrically located with respect to x-axis is offset-fed by a line source. The line source is lying parallel to the z-axis and off the focus of the reflector. Diffracted fields are evaluated asymptotically by means of the Edge Point Method. An approximate way of expressing uniform diffracted fields is used by utilizing the Signum and Fresnel functions together to overcome the non-uniform situations. Total scattered, diffracted, and reflected fields are plotted numerically for some parameters such as parabola width and location angle of the line source in the problem.

Keywords- - Line Source, Parabolic Antenna, Offset Feed, Diffraction

I. INTRODUCTION

Offset-fed reflector has long been studied by many researchers. Ingerson and Wong investigated the focal region features of offset fed reflector antennas [1]. The design of a dual-mode corrugated matched feed is also carried out [2]. Adatia and Rudge derived a formula for the squint effect magnitude providing good correlation with computed values of numerical models of offset reflectors and with experimental results as well [3]. A new class of primary-feed antennas is suggested [4]. In the study of Watson, Rudge and Adatia, design and evaluation of a dual-polarised mode is presented [5]. Cross-polar performance of an offset parabolic reflector fed by a rectangular matched feed is examined [6].

Rudge presented a mathematical model providing predictions of principally polarised and cross-polarised radiations for the fields propagated by offset parabolic reflector [7]. Watson examined the field distribution for a finite axially-symmetric parabolic reflector [8]. To obtain far fields of an antenna, Physical Optics (PO) or the ray optics methods are used but they require time consuming integrations. Instead, beam tracking is used by employing the complex-source point or evanescent wave tracking methods both of which are studied for a parabolic antenna whose offset beam feed is located at the focus [9]. Suedan and Jull applied the complex source point technique to parabolic cylinder reflectors and offset parabolic reflector examples [10]. Diffraction-resistant beams are proposed by means of a parabolic reflector and a spherical wave source which is placed near the focus [11].

Scattering and other aspects of parabolic reflectors without offset feed have already been studied for decades. Kennaugh and Ott examined the fields near the focus of a finite parabolic reflector [12]. Rudge derived the principal electric field components for a parabolic reflector by using the scalar wave theory [13]. In the study of James and Poulton, modified half plane diffraction coefficients are used for a plane wave to obtain the field near the parabolic reflector. It was observed that the result was consistent with the method of PO [14]. Knop and Ostertag evaluated the asymptotic PO expression of the scattered fields by a paraboloid [15]. Beam diffraction by a parabolic reflector is examined for a two dimensional case [16]. Umul examined the line source field scattering by a parabolic impedance reflector [17] by means of MTPO integrals [18]. We investigated the scattering phenomenon of an inhomogeneous plane wave by a cylindrical parabolic PEC reflector [19]. In that study, homogeneous case is also considered. Sarnık and Yalçın examined the fields scattered by PEC parabolic reflector [20]. Yalçın examined scattering from a perfectly conducting cylindrical reflector by the method of the modified theory of physical optics [21].

In this study, we will investigate the diffraction effects of a parabolic PEC reflector offset-fed by a line source. The edge point method will be used to evaluate the diffracted fields which plotted for the parameters, such as offset angle of the source location, observation and source distances to the origin of the geometry.

II. THEORY

The scattering integrals of the MTPO used in [17] can be adapted for the parabolic PEC reflector shown in Fig. 1 as

$$E_{scattered} = \frac{e^{-jk\rho_3}}{\sqrt{k\rho_3}} + \frac{ke^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\varphi_e}^{\varphi_e} f(\alpha, \beta) \frac{e^{-jk\rho_1}}{\sqrt{k\rho_1}} \frac{e^{-jk\rho_2}}{\sqrt{k\rho_2}} \rho' \frac{d\varphi'}{\cos\left(\frac{\varphi'}{2}\right)} \quad (1)$$

where k is the wave number which is equal to $2\pi/\lambda$, and λ is the wavelength. ρ_1 is the distance between the source and reflection point Q. ρ_2 and ρ_3 are defined in Fig. 1 as the distances of source point and reflection point Q to the observation point P respectively. Reflector is located symmetrically with respect to the horizontal line ($\varphi' = 0$).

$$f(\alpha, \beta) = \sin\left(\frac{\beta+\alpha}{2}\right) - \sin\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right), \quad (2)$$

where α and β are the angles between the surface normal, and ρ_1 and ρ_2 respectively. The first term in Eq.(2) represents the reflected field while the second term determines the incident-diffracted field of the scattering integral given in Eq.(1). Surface equation of the parabola is written as

$$\rho' = \frac{f}{\cos^2\left(\frac{\varphi'}{2}\right)}, \quad (3)$$

where f is its focus.

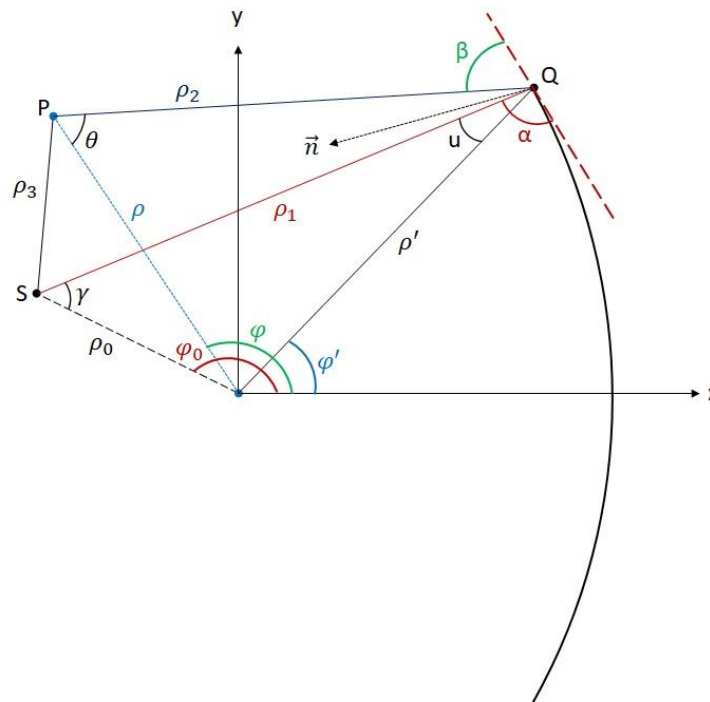


Figure. 1. Geometry of the problem.

Edge diffracted field is calculated by the Edge Point Method as

$$E_d \cong \frac{1}{jk} \frac{e^{jk g(\varphi'_e)}}{g'(\varphi'_e)} f(\varphi'_e) \quad (4)$$

where the $g(\varphi'_e)$ is the phase function and expressed as the sum of ρ_1 and ρ_2 at the edge point as

$$g(\varphi'_e) = \rho_{1e} + \rho_{2e}, \quad (5)$$

and $g'(\varphi'_e)$ is the first derivative of $g(\varphi'_e)$.

f_e is given as

$$f_e = \frac{ke^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi}} f(\alpha, \beta) \frac{\rho'_e}{\cos\left(\frac{\varphi'_e}{2}\right) \sqrt{k^2 \rho_{1e} \rho_{2e}}}. \quad (6)$$

ρ_1 and ρ_2 can be expressed as

$$\rho_1 = \rho_0 \cos \gamma + \rho' \cos u, \quad (7)$$

and

$$\rho_2 = \rho \cos \theta - \rho' \cos(u - \alpha - \beta) \quad (8)$$

For the first derivative of Eq. (4) we write

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial \varphi'} = -\rho_0 \sin \gamma + \rho' \frac{\sin \frac{\varphi'}{2}}{\cos \frac{\varphi'}{2}} \cos u \quad (9)$$

and

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial \varphi'} = -\rho \sin \theta + \rho' \frac{\sin \frac{\varphi'}{2}}{\cos \frac{\varphi'}{2}} \cos(u - \alpha - \beta). \quad (10)$$

Phase function derivative is obtained as

$$g'(\varphi') = \frac{\partial \rho_1}{\partial \varphi'} + \frac{\partial \rho_2}{\partial \varphi'} = \frac{\rho' \cos \alpha - \rho' \cos \beta}{\cos \frac{\varphi'}{2}}. \quad (11)$$

At the edge point Eq. (10) is written as

$$g'(\varphi'_e) = \frac{\rho'_e (\cos \alpha_e - \cos \beta_e)}{\cos \left(\frac{\varphi'_e}{2} \right)}. \quad (12)$$

As a result, diffracted field is reduced to

$$E_d = \frac{1}{\rho'_e} \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{jk(\rho_{1e} + \rho_{2e})}}{\sqrt{k^2 \rho_{1e} \rho_{2e}}} \frac{f(\alpha, \beta) \cos \left(\frac{\varphi'_e}{2} \right)}{\cos \alpha_e - \cos \beta_e}, \quad (13)$$

or

$$E_d = \frac{1}{\rho'_e} \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{jk(\rho_{1e} + \rho_{2e})}}{\sqrt{k^2 \rho_{1e} \rho_{2e}}} \frac{f(\alpha, \beta) \cos \left(\frac{\varphi'_e}{2} \right)}{2 \sin \left(\frac{\beta + \alpha}{2} \right) \sin \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right)}. \quad (14)$$

Diffracted field can be expressed by the Signum and Fresnel functions to avoid non-uniform field plots as

$$E_d = \frac{\cos \left(\frac{\varphi'_e}{2} \right)}{\rho'_e} \frac{e^{jk\rho_{1e}}}{\sqrt{k\rho_{1e}}} \left(e^{jk\rho_{1e} \cos(\beta_e - \alpha_e)} \text{sign}(t_1) F[|t_1|] - e^{jk\rho_{1e} \cos(\beta_e + \alpha_e)} \text{sign}(t_2) F[|t_2|] \right) \quad (15)$$

where

$$t_1 = \sqrt{2k \rho_{2e}} \sin \left(\frac{\beta_e - \alpha_e}{2} \right), \quad (16)$$

$$t_2 = \sqrt{2k \rho_{2e}} \sin \left(\frac{\beta_e + \alpha_e}{2} \right), \quad (17)$$

and the Fresnel function is defined as

$$F[x] = \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-jt^2} dt. \quad (18)$$

Sign(x) is the Signum function which is 1 for $x > 0$, and -1 for $x < 0$.

III. NUMERICAL ANALYSIS

In this section, we will examine the scattering characteristics of the offset-fed parabolic reflector for some parameter values. The total scattered field given in Eq.(1), reflected and diffracted fields will be plotted numerically. The focal length f is taken as 6λ . The value of ρ is equal to 3λ , and $\rho_0 = 5\lambda$ where the wave number λ is taken as 0.1 meter. Reflected and diffracted fields given in Eq. (19) and Eq. (20) respectively will be used for the plots.

$$E_r = \frac{ke^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\varphi_e}^{\varphi_e} \sin\left(\frac{\beta+\alpha}{2}\right) \frac{e^{-jk\rho_1}}{\sqrt{k\rho_1}} \frac{e^{-jk\rho_2}}{\sqrt{k\rho_2}} \rho' \frac{d\varphi'}{\cos\left(\frac{\varphi'}{2}\right)}. \quad (19)$$

Diffracted field is

$$E_{diffracted} = \frac{e^{-jk\rho_3}}{\sqrt{k\rho_3}} - \frac{ke^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\varphi_e}^{\varphi_e} \sin\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) \frac{e^{-jk\rho_1}}{\sqrt{k\rho_1}} \frac{e^{-jk\rho_2}}{\sqrt{k\rho_2}} \rho' \frac{d\varphi'}{\cos\left(\frac{\varphi'}{2}\right)}. \quad (20)$$

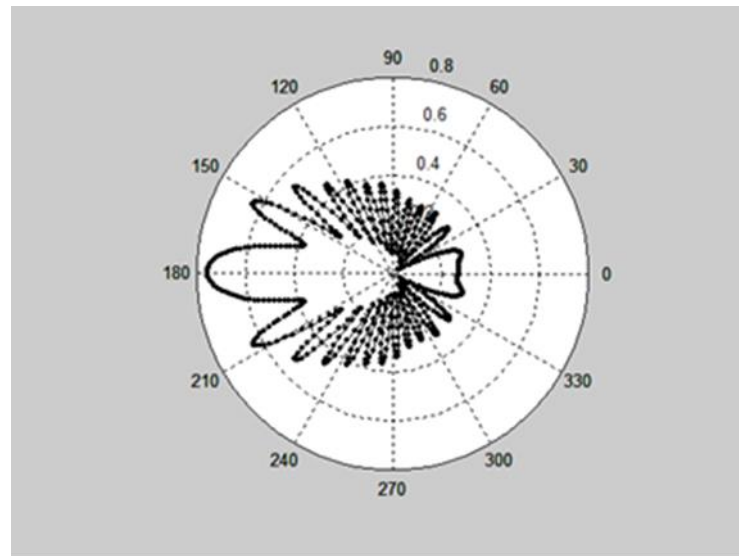


Figure 2. Total scattered field for $\varphi_0=\pi$.

Total scattered field is the combination of the reflected and diffracted fields. When $\varphi_0=\pi$ total scattered field is symmetrical with respect to the horizontal line of polar configuration as shown in Fig. 2. This is expected due to the geometry of Fig. 1.

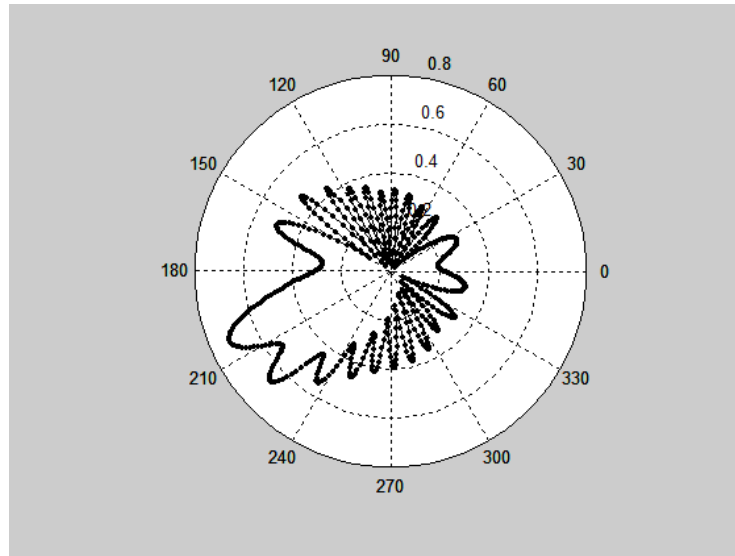


Figure 3. Total scattered field for $\varphi_0=7\pi/6$.

When the source is located on the place with an angle of $7\pi/6$, total scattered field pattern is oriented approximately in that direction as shown in Fig.3.

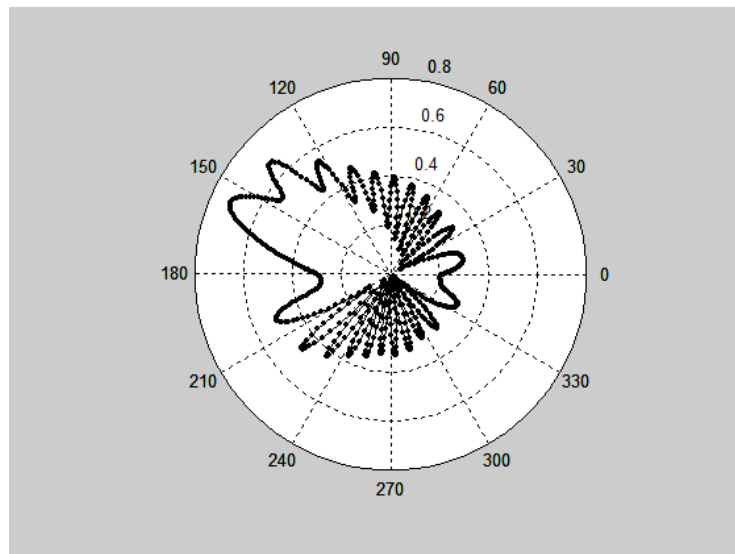


Figure 4. Total scattered field for $\varphi_0=5\pi/6$.

Similarly, total scattered field is obtained in Fig. 4 when the source is located at $\varphi_0=5\pi/6$.

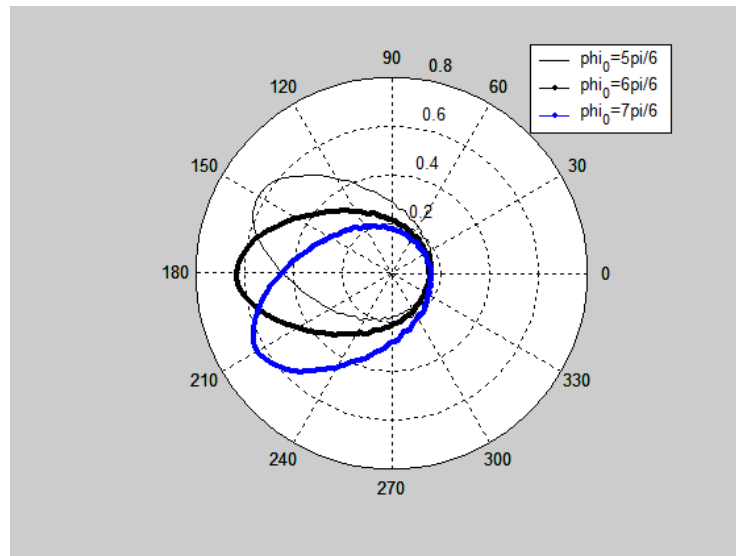


Figure 5. Total diffracted field variation for some φ_0 values.

Total transmitted field and diffracted field variations for some φ_0 values are depicted in Fig. 5 and Fig. 6 respectively. Total transmitted field is the summation of the incident and diffracted fields. As can be seen from Fig.5 that incident field determines the total transmitted field orientation. Because diffracted field occurs almost in all directions as depicted in Fig. 6. Also its contribution to the total transmitted field is much less than the incident field which can be seen from Fig. 6 as well.

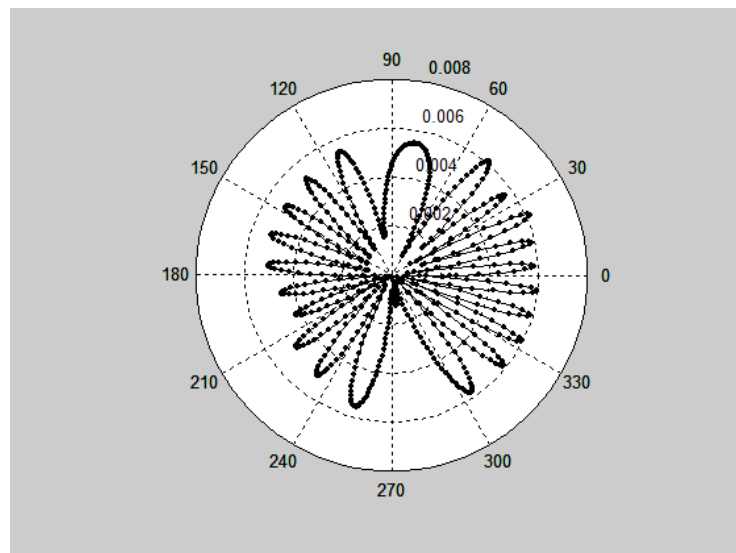


Figure 6. Diffracted field variation for $\varphi_0=5\pi/6$.

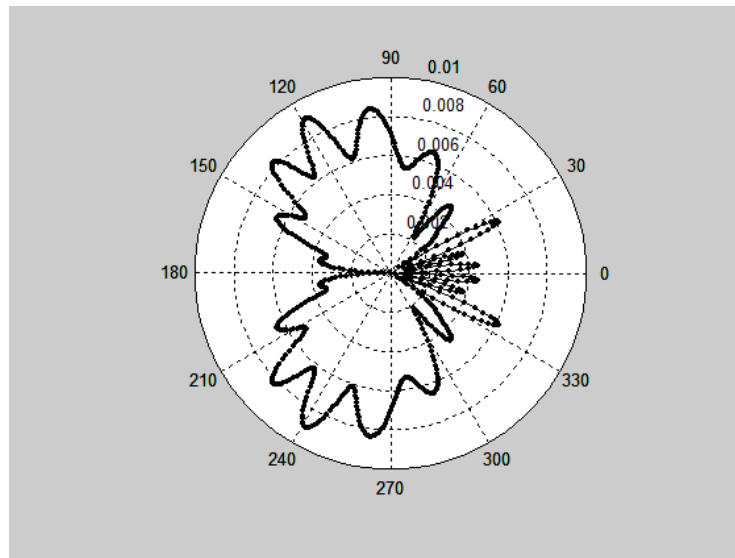


Figure 7. Reflected field variation for $\varphi_0=\pi$.

In Fig. 7, two main lobes of the reflected field that are symmetrical due to the source orientation are seen when the source is located on the horizontal line ($\varphi_0=\pi$).

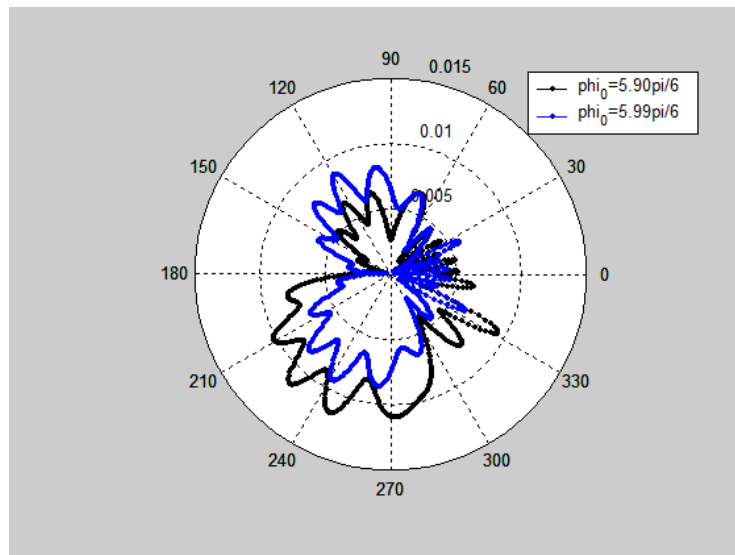


Figure 8. Reflected variations for some φ_0 values.

In Fig.8, as φ_0 tends to move clockwise away from π , main lobe start to occur in the lower part of the coordinate system due to the reflection phenomenon. Also, the upper part lobe gets smaller gradually. In a similar manner, main lobe occurs in the upper part in Fig. 9.

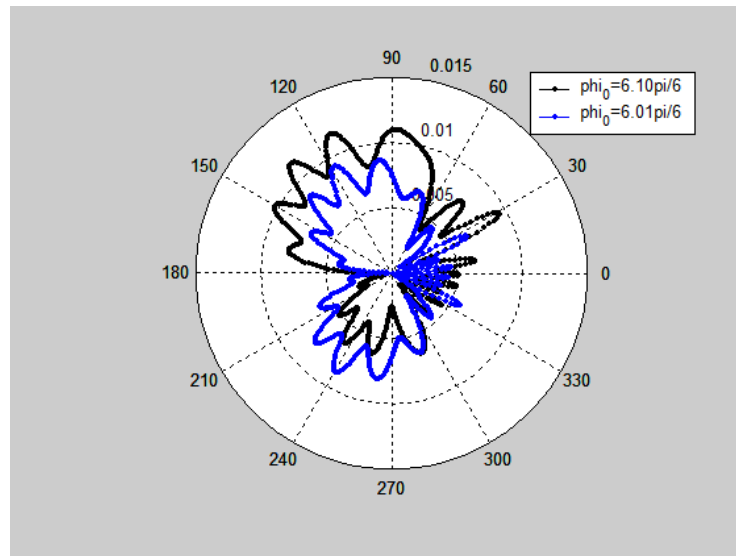


Figure 9. Reflected field variations for some φ_0 values.

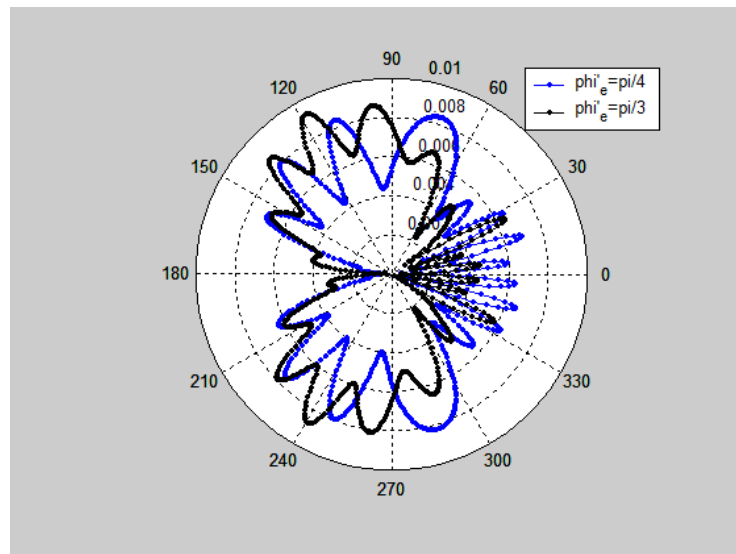


Figure 10. Reflected field variations due to reflector width.

Fig. 10 shows the variations of the reflected field due to the parabola width. It is seen that as the parabola width increases, scattering at the back side direction of the parabola decreases. Meanwhile, reflected field amplitude at the parabola front increases.

IV. CONCLUSION

Scattering integral, obtained via the surface integrals of the MTPO, of a line source field by a parabolic PEC reflector is employed to find the diffracted fields asymptotically. The parabolic reflector is considered with an offset feed by a line source placed off its focus. Diffracted field is obtained by the Edge Point Method and rewritten by means of Signum and Fresnel functions to avoid non-uniform field expression. Reflected and diffracted field variations and orientations are plotted numerically according to some parameter values. It is observed that as the width of the parabolic reflector increases, reflection to the front side of the reflector increases as well. However, reflected field at the back region of the parabola decreases.

REFERENCES

- [1] Ingerson, P. G., Wong, W. C. (1974). Focal region characteristics of offset fed reflectors. *Antennas and Propagation Society International Symposium* 12, 121-123.
- [2] Sharma, S. B., Pujara, D., Chakrabarty, S. B., et. al. (2009). Cross-polarization cancellation in an offset parabolic reflector antenna using a corrugated matched feed. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 861-864.
- [3] Adatia, N. A., Rudge, A. W. (1975). Beam squint in circularly polarised offset-reflector antennas. *Electronics Letters*, 11, 513-515.
- [4] Rudge, A. W., Adatia, N. A. (1975). New class of primary-feed antennas for use with offset parabolic-reflector antennas. *Electronics Letters*, 11, 597-599.
- [5] Watson, K., Rudge, A. W., Adatia, N. A. (1978). Dual-polarized mode generator for cross-polar compensation in parabolic reflector antennas. *8th European Microwave Conference*, Paris, France, 183-187.
- [6] Strutzman, W., Terada, M. (1993). Design of offset-parabolic-reflector antennas for low cross-pol. and low sidelobes. *IEEE Antennas Propagation Magazine*, 35, 46-49.
- [7] Rudge, A.W. (1973). Improving the cross-polar performance of an offset parabolic reflector antenna using a rectangular matched feed. *Electronic Letters*, 9, 611-613.
- [8] Watson, W. H. (1964). Offset-reflector antennas with offset feeds. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 12, 561-569.
- [9] Hasselman, F. J. V., Felsen, L. B. (1982). Asymptotic analysis of parabolic reflector antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 30, 677-685.
- [10] Suedan, G. A., Jull, E. V. (1991). Beam diffraction by planar and parabolic reflectors. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 39, 521-527.
- [11] Zamboni-Rached, M., De Assis, M. C., Ambrosio, L. A. (2015). Diffraction-resistant scalar beams generated by a parabolic reflector and a source of spherical waves. *Applied Optics*, 54, 5949-5955.
- [12] Kennaugh, E., Ott, R. (1964). Fields in the focal region of a parabolic receiving antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 12 (3), 376-377.
- [13] Rudge, A. W. (1969). Focal-plane field distribution of parabolic reflectors. *Electronics Letters*, 5, 510-512.
- [14] James, G.L., Poulton, G.T. (1973). Modified diffraction coefficients for focusing reflectors. *Electronics Letters*, 9, 537-538.
- [15] Knop, C. M., Ostertag, E. L. (1977, July). A note on the asymptotic physical optic solution to the scattered fields from a paraboloidal reflector. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 531-534.

- [16] Suedan, G. A., Jull, E. V. (1989). Beam diffraction by parabolic reflector. Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium, 1, 274-277.
- [17] Umul, Y. Z. (2008). Scattering of a line source by a cylindrical parabolic impedance surface. Journal of Optical Society of America, 25, 1652-1659.
- [18] Umul, Y. Z. (2004). Modified theory of physical optics. Optics Express, 12, 4959-4972.
- [19]. Kara, M. (2016). Scattering of a plane wave by a cylindrical parabolic perfectly electric conducting reflector. Optik, 127, 4531-4535.
- [20] Sarnık, M., Yalçın, U. (2017). Uniform scattered fields from a perfectly conducting parabolic reflector with modified theory of physical optics. Optik, 135, 320-326.
- [21]. Yalçın, U. (2007). Scattering from a cylindrical reflector: modified theory of physical optics solution. Journal of Optical Society of America, 24, 502-506.

Araştırma Makalesi – Research Article

Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Tabanlı Yükselten Tip DA-DA Çevirici Yapısının Denetimi ve Deneysel Analizi

Hakan Açıkgöz^{1*}, Ö. Fatih Keçecioglu²

Geliş / Received: 11/05/2020

Revize / Revised: 17/06/2020

Kabul / Accepted: 23/06/2020

ÖZ

Bu çalışmada, yükselten tip DA-DA çeviricinin çıkış geriliminin denetimi için Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici (AT2BMD) yapısı önerilmiştir. Bu denetleyici yapısı ile yük değişimine karşı DA-DA çeviricinin dinamik cevabının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak yükselten tip DA-DA çevirici yapısı deneysel olarak geliştirilmiştir. Daha sonra önerilen denetleyici yapısının performansının ve güvenilirliğinin incelenmesi için birbirinden farklı iki deneysel çalışma durumu oluşturulmuştur. AT2BMD ile Tip-1 BMD (T1BMD) bu çalışma durumları altında karşılaştırılmıştır. Bu denetleyici yapılarının deneysel çalışmalara uygulanabilmesi için dSPACE DS1104 denetleyici kartı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen denetleyici yapısının her iki deneysel çalışmada da T1BMD'den daha tatmin edici dinamik cevaplar sağladığı açıkça gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- *DA-DA Çevirici, Akıllı Denetleyici, Tip-1 Bulanık Mantık Denetleyici, Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: hakan.acikgoz@gibtu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6432-7243>)

Gaziantep İslam, Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep

²İletişim: fkececioglu@ksu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7004-4947>)

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

Control and Experimental Analysis of DC-DC Boost Converter Based on Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller

ABSTRACT

In this study, Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller (IT2FLC) structure is proposed for the control of the output voltage of DC-DC boost converter. With this controller structure, it is aimed to improve the response of DC-DC boost converter structure against load changes. First, DC-DC boost converter structure has been experimentally developed for this purpose. Then two different experimental operating conditions are prepared to investigate the performance and reliability of the proposed controller. IT2FLC and Type-1 FLC (T1FLC) are compared under these conditions. dSPACE DS1104 controller card is used to apply these controller structures to experimental studies. According to the obtained results, it is clearly observed that the proposed controller structure is provided more satisfactory dynamic response than T1FLC in both experimental studies.

Keywords- *DC-DC Converter, Intelligent Controller, Type-1 Fuzzy Logic Controller, Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller*

I.GİRİŞ

DA-DA çeviriciler yapılarında bulunan güç elektroniği elemanlarının sayesinde giriş kısmındaki DA gerilimi başka bir seviyeye dönüştürerek kesintisiz güç kaynağı, DA motor sürücülerini, hibrid elektrikli araçlarda ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar [1-3]. Bu çeviriciler doğrusal olmayan yapılarından dolayı birçok çalışmanın da odak noktası haline gelmiştir. Bu çalışmalar yeni tasarım ve dayanıklı denetim ilkelerine dayanmaktadır [4-5]. Bilindiği gibi DA-DA çevirici yapılarının çıkışlarından belirli bir seviyeye kadar gerilim değerleri elde edilebilmektedir. Bu kısıtlamaları ortadan kaldırmak için birçok araştırmacı yüksek kazançlı DA-DA çevirici yapılarını tasarlamaktadırlar [6]. Bu çevirici yapılarının denetimlerinde ise basit yapılarından ve uygun maliyetlerinden dolayı klasik Oransal+Integral (PI) denetleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu denetleyicilerin sabit parametrelere sahip olmasından dolayı zayıf performans göstermeleri de kaçınılmaz bir durum olarak ortaya çıkmaktadır. Birçok uygulama için gerekli olan geçici durumlara karşı hızlı cevap verebilme ve kararlı durumda ise bozuculara karşı dayanıklı bir performans gösterme özellikleri DA-DA çevirici yapılarından da istenilen en önemli çalışma durumları olarak düşünülebilir. Bu çalışma durumlarını sağlayabilmek için akıllı denetleyici yapılarına gerek duyulmaktadır [7-8].

L. Zadeh [9] tarafından ortaya atılan bulanık mantık kavramı akıllı denetleyici yapılarının başında gelmektedir. Klasik kümelerde kullanılan keskin küme değerleri yerine bulanık mantıkta kümeler $[0,1]$ arasındaki değerlere sahip olmaktadır. Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) yapıları Tip-1 ve Tip-2 olmak üzere iki tasarıma sahiptir. Tip-1 BMD (T1BMD) yapısı; bulanıklaştırıcı, kural tabanı, çıkarım mekanizması ve durulaştırıcı gibi dört ana kısımdan oluşmaktadır. T1BMD'ler birçok endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bilindiği gibi T1BMD'lerde uzman bilgi ve birikimi çok önemlidir [10-11]. Bu tip denetleyicilerde kullanılan kümeler $[0,1]$ arasında net değere sahip oldukları için kurallarda meydana gelen belirsizliklerle baş etmede yeterli özelliklere sahip değildirler. Ayrıca, kural tabanında kullanılan dilsel terimler farklı kişiler için farklı yorumlamalara neden olmaktadır ve bu da kurallardaki belirsizliklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır [12-13]. Yukarıda belirtilen problemleri azaltmak için L. Zadeh [14] T1BMD'nin genişletilmiş versiyonu olan T2BMD yapısını önermiştir. Bu bulanık yapı da "Eğer-O Halde" kuralları ile karakterize edilmektedir. T2BMD'ler, T1BMD'lerdeki gibi dört ana kısmın haricinde tip indirgeme birimine sahiptir. T2BMD'lerde kullanılan üyelik fonksiyonlarının üyelik dereceleri $[0,1]$ arasındaki bulanık sayılarla ifade edilmektedir. Bu durum üyelik fonksiyonlarındaki belirsizliklerin çözümünde önemli bir araç olabilmektedir [15-20].

Yükselten tip DA-DA çevirici yapılarının denetimi için literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bennaoui ve Saadi [21], yükselten tip DA-DA çevirici yapısının çıkış geriliminin denetimi için T2BMD tabanlı PID denetleyici yapısını önermişlerdir. Bu denetleyicinin performansını değerlendirmek için T1BMD tabanlı PID denetleyici ile karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Denetleyici yapılarının performansları, hatanın karesinin integrali ve hatanın mutlak değerinin integrali gibi performans kriterleri bakımından incelenmiştir. Seo ve Choi [22], kesir dereceli bir PID denetleyici ile DA-DA çeviricinin performansını deneysel çalışmalar yaparak incelemişlerdir. Çevirici yapısı ile önerilen denetleyici için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar ile önerilen denetleyicinin pratik uygulanabilirliği ve etkinliği doğrulanmıştır. Elmas ve arkadaşları [23], DA-DA çevirici için uyarlamalı bir algoritmaya sahip olan BMD yapısını önermişlerdir. Çalışmada kullanılan denetleyici yapısı için mikroişlemci tabanlı uygulama çalışması gerçekleştirilmişlerdir. Bu çalışmalar ile önerilen BMD'nin performansı incelenmiştir. Yazıcı ve Yaylacı [24], DA-DA çeviricinin çıkış geriliminin denetimi için hızlı terminal Kayma Modlu Denetleyici (KMD) önermişlerdir. Giriş gerilimindeki ve yükteki değişimlere karşı dayanıklı bir çevirici yapısının gerçekleştirilmesi temel amaç olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar yapılarak önerilen denetleyicinin etkinliği ve performansı kapsamlı olarak gözlemlenmiştir. Kim ve Lee [25], geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemine dayalı bir çıkış gerilim denetimini DA-DA çevirici için sunmuşlardır. 3 kW'lık bir çevirici yapısı deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel ve benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile denetleyici yapısının bozucu girişlere karşı davranışı araştırılmıştır. Karamanakos ve arkadaşları [26], model öngörülü bir denetleyici yapısını DA-DA çevirici için tasarlamışlardır. Önerilen denetim stratejisi akım denetim döngüsüne gereksinimi ortadan kaldırarak çıkış geriliminin regülasyonunu sağlamaktadır. Önerilen denetleyici yönteminin üstünlüklerini göstermek için benzetim ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Oucheriah ve Guo [27], gözlemleyici tabanlı bir KMD'yi DA-DA çevirici çıkış geriliminin denetimi için kullanmışlardır. Kapalı çevrimli bu yöntem ile tüm sistemin asimptotik olarak kararlı olması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar ile oluşturulan senaryolarda önerilen yöntemin davranışı incelenmiştir. Wai ve Shih [28], yükselten tip DA-DA çeviricinin çıkış geriliminin denetimi için uyarlanabilir bir

sinirsel bulanık ağ tabanlı bir denetim şemasını tasarlamışlardır. Denetleyici yapısının kararlılığını arttırmak için Lyapunov teoremi yardımıyla çevrimiçi öğrenme algoritmaları türetilmiştir. Çevirici ve denetleyici yapısı için detaylı modeller yapılmış ve deneysel performans karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Cheng ve arkadaşları [29], DA-DA çeviricinin denetimi için bulanık-sinirsel temelli bir KMD yapısını önermişlerdir. Önerilen denetleyici yapısının çevrim içi eğitimi için Lyapunov metodu tercih edilmiştir. Bu yöntemin başarımının testi, giriş gerilimi ve yük direnci değişimleri altında incelenmiştir.

Bu çalışmada, klasik yükselten tip DA-DA çeviricinin çıkış geriliminin denetimi için dayanıklı bir yapıya sahip olan Aralıklı T2BMD (AT2BMD) önerilmiştir. T2BMD'nin belirsizliklere sahip olan sistemlerde T1BMD'lere göre daha iyi performansa sahip oldukları bilindiği için DA-DA çevirici yapısının çıkış geriliminin sistemdeki bozulmalara karşı dayanıklılığının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için deneysel bir kurulum gerçekleştirilmiştir. Her iki denetleyici yapıları Matlab/RTI blokları ile modellenerek DS1104 denetleyici kart sayesinde DA-DA çevirici yapısına uygulanmıştır. Ayrıca deneysel çalışma durumları oluşturulmuş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmanın diğer kısımları şu şekilde açıklanabilir. 2.kısımda DA-DA çevirici için matematiksel modelleme yapılmıştır. Önerilen denetleyici yapısının özellikleri ve tasarımı 3.kısımda gerçekleştirilmiştir. Deneysel kurulum ve performans çalışmaları 4.kısımda sunulmuştur. 5.kısımda ise elde edilen sonuçlara göre genel bir değerlendirme yapılarak sonuçlar verilmiştir.

II. DA-DA ÇEVİRİCİ YAPISININ MATEMATİKSEL MODELİ

Yükselten tip DA-DA çevirici yapıları, girişindeki gerilim seviyesini daha yüksek bir gerilim değerine getiren devrelerdir. Devre yapıları; anahtarlama elemanı, bobin, kondansatör, diyot ve yük direncinden oluşmaktadır. Yükselten tip DA-DA çevirici devresinin analizi, anahtarın kesim ve iletim durumları dikkate alınarak yapılmaktadır [1-2]. Yükselten tip DA-DA çevirici yapısı ve anahtarın iletim ve kesim durumları Şekil 1'de sunulmuştur. İlk olarak Şekil 1 (b)'de gösterilen anahtarın iletim durumu analiz edildiğinde; çevirici yapısında uygulanan gerilim ile bobin üzerindeki gerilim birbirine eşit olur ve aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$v_i = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

Burada; v_i , giriş gerilimi ve di_L/dt , ise bobin üzerinden geçen akımın değişimidir. Bilindiği gibi anahtarın iletim durumunda bobin üzerinden doğrusal bir akım akar ve bu akım ise;

$$\Delta i_L = \frac{v_i dT}{L} \quad (2)$$

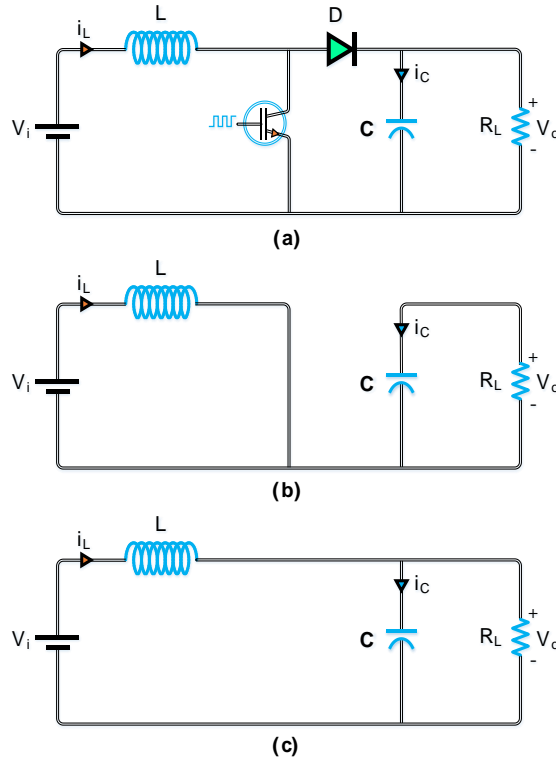
olarak yazılabilir. Şekil 1 (c)'de verilen anahtarın kesim durumu için ilk olarak gerilimler arasındaki ifade aşağıdaki gibidir:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o \quad (3)$$

Burada; v_L , giriş gerilimini, v_o ise çıkış gerilimini göstermektedir. Bobin üzerinden geçen akımın değişimi ise aşağıdaki denklem ile elde edilebilir:

$$\Delta i_L = \frac{(v_i - v_o)(1-d)T}{L} \quad (4)$$

Burada; d görev oranıdır. DA-DA çevirici yapısının kararlı durumda çalıştığı düşünülürse iletim ve kesim durumlarında bobin üzerinden geçen akımların değişimleri birbirine eşit olmalıdır.



Şekil 1.a) DA-DA çevirici yapısı b) Anahtarın iletimde olma durumu c) Anahtarın kesimde olma durumu

Daha önce verilen değişim denklemleri düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{v_i DT}{L} = \frac{(v_i - v_o)(1-d)T}{L} \quad (5)$$

Yukarıdaki denklem düzenlenirse çıkış gerilimi;

$$v_o = \frac{v_i}{(1-d)} \quad (6)$$

olarak bulunur. DA-DA çevirici yapısı için giriş ve çıkış güçleri birbirine eşitlenirse;

$$v_i i_L = \frac{(v_i / (1-d))^2}{R_{yük}} = \frac{(v_i)^2}{(1-d)^2 R_{yük}} \quad (7)$$

elde edilir. Burada; $R_{yük}$, çıkış kısmına bağlanan yük direncidir. Bobin üzerinde geçen akımın minimum ve maksimum değerleri aşağıdaki gibidir:

$$i_{max} = \frac{v_i}{(1-d)^2 R_{yük}} + \frac{v_i dT}{2L} \quad (8)$$

$$i_{min} = \frac{v_i}{(1-d)^2 R_{yük}} - \frac{v_i dT}{2L}$$

Ayrıca, DA-DA çevirici yapısının tasarımı bobin ve kondansatör değerlerinin doğru bir şekilde bulunması sistem performansı için oldukça önemlidir [1]. Bu nedenle bobin ve kondansatör değerleri için aşağıdaki denklemler kullanılabilir:

$$L_{\min} = \frac{d(1-d)^2 R_{yük}}{2f} \quad (9)$$

$$\Delta V_c = \frac{v_o dT}{R_{yük} C} \quad (10)$$

Burada; V_c , kondansatör üzerindeki gerilimdir. C ise kondansatör değeridir.

III. ARALIKLI TİP-2 BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ YAPISININ TASARIMI

Tip-1 bulanık kümelerin aksine tip-2 bulanık kümeler dilsel değişkenlerdeki belirsizlikleri ve sayısal belirsizliklerden kaynaklanan problemlerin modellenmesinde daha üstün özelliklere sahiptirler [14-17]. Bilindiği gibi tip-1 bulanık kümeler giriş ve çıkışlardaki belirsizlerin modellenmesinde keskin değerlere sahip üyelik fonksiyonlarını kullanmaktadır. Bu durumun çıkartılabilecek en önemli çıkarım; üyelik fonksiyonlarındaki belirsizliklerle mücadele etmede tip-1 kümelerin yetersiz kaldığıdır. Yukarıda bahsedilen belirsizliklerin etkilerinin en aza indirilmesi için tip-2 bulanık kümeler önemli bir araç olmuştur ve birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaya da başlanmıştır [18-20]. Tip-2 bulanık kümelerin en belirgin özellikleri ise kullanılan üyelik değerlerinin $[0,1]$ arasında bulanık bir küme olması ve bu durumda belirsizlikleri en aza indirmede kullanılan belirsizliğin ayak izlerinin ortaya çıkarılmasıdır [16]. A ile gösterilen bir tip-2 bulanık küme aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

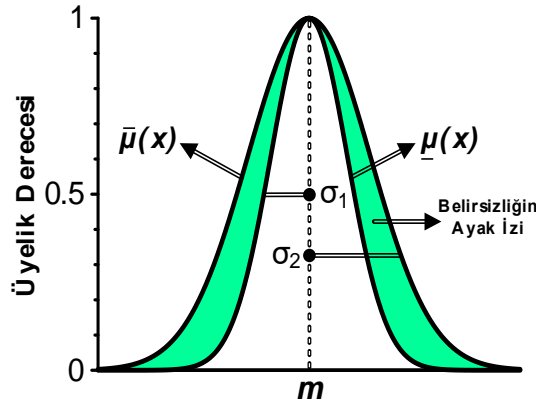
$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u)\}, \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1] \quad (11)$$

Burada, $0 \leq \mu_{\tilde{A}} \leq 1$. Aralıklı tip-2 kümelerin hesap yükü daha az olduğu için daha yaygın olarak tercih edilmektedirler. Aralıklı tip-2 küme:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1/(x, u), J_x \subseteq [0,1] \quad (12)$$

olarak ifade edilebilir. Burada; \iint tüm kabul edilebilir m ve u üzerindeki birleşimi ifade eder. J_x ise x girişinin birincil üyelik fonksiyonu olarak belirtilir. Tüm birincil üyelik fonksiyonları arasında kalan alan Belirsizliğin Ayak İzi (FOU) olarak ifade edilmektedir [14-16]. Şekil 2'de gösterilen Gauss üyelik fonksiyonları arasında kalan diğer bir deyişle alt ve üst üyelik fonksiyonları ile sınırlanmış bu alan aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$FOU(\tilde{A}) = U_{\forall x \in X} J_x = \{(x, u) : u \in J_x \subseteq [0,1]\} \quad (13)$$



Şekil 2. Tip-2 üyelik fonksiyonu ve Belirsizliğin ayak izi

Alt ve üst üyeliklere sahip olan Gauss üyelik fonksiyonu matematiksel olarak aşağıdaki gibi sunulabilir:

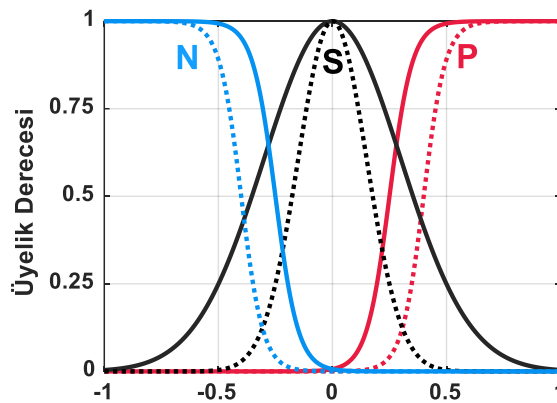
$$\begin{aligned}\bar{\mu}_{A_j}(x_i) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - m_{ij}}{\bar{\sigma}_{ij}}\right)^2\right\} \\ \underline{\mu}_{A_j}(x_i) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - m_{ij}}{\underline{\sigma}_{ij}}\right)^2\right\}\end{aligned}\quad (14)$$

Burada; $\mu_{A_j}(x_i)$ giriş değişkeni için üyelik derecesini simgelemektedir. m ve σ değişkenleri sırası ile üyelik fonksiyonunun merkezini ve genişliğini temsil etmektedir. AT2BMD yapısı iki girişe ve tek çıkışa sahiptir. İlk olarak girişlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu girişler çıkış gerilimi ve referans gerilimi arasındaki fark ile hatanın değişimi olarak belirlenmiştir.

$$e(t) = v_o^*(t) - v_o(t) \quad (15)$$

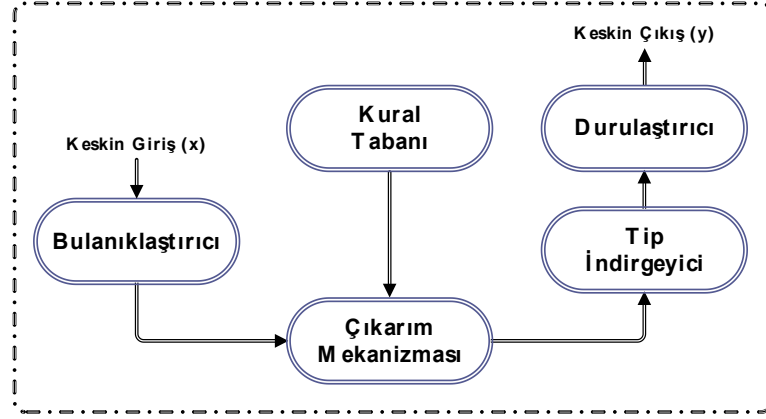
$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad (16)$$

Bu girişler için kullanılan Gauss üyelik fonksiyonları Şekil 3'de verilmiştir. Bu üyelik fonksiyonları [-1,1] değerleri arasında Pozitif (P), Sıfır (S) ve Negatif (N) gibi üç dilsel ifade ile etiketlenmiştir.



Şekil 3. Hata ve hatanın değişimi için kullanılan üyelik fonksiyonları

Tip-1 bulanık sistemlere benzer yapıya sahip olan tip-2 bulanık sistemlere ait genel blok şeması Şekil 4'te sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi Bulanıklaştırıcı, Kural Tabanı, Çıkarım Mekanizması, Tip İndirgeyici ve Durulaştırıcı'dan oluşan birimler bulunmaktadır. Bu birimler şu şekilde tanımlanabilir [10-11,16]. Bulanıklaştırıcı, girişleri $(x=x_1, \dots, x_p)$ daha önce tanımlanan üyelik fonksiyonlarına net bir nokta olarak eşler.



Şekil 4. AT2BMD'nin genel yapısı

Kural tabanında ise dilsel terimler kullanılarak tip-1 bulanık sistemlere benzer şekilde aşağıdaki gibi p girişli ve z çıkışlı bir AT2BMD için genel bir ifade ile açıklanabilir:

$$R^i = IF \ x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^i \text{ ve } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^i \text{ THEN } y \text{ is } \tilde{G}^i \quad (17)$$

Burada; $l=1, \dots, M$ olarak ifade edilir. M , kural tabanında kullanılan kural sayısıdır. Bu çalışmada üç üyelik fonksiyonu seçilerek Tablo 1'deki 9 kural oluşturulmuştur.

Tablo 1. AT2BMD için oluşturulan kurallar

Δu		e		
		N	S	P
Δe	N	N	N	S
	S	N	S	P
	P	S	P	P

Çıkarım mekanizması, tüm kuralları birleştirir ve giriş tip-2 bulanık değerleri çıkış tip-2 bulanık değerlere dönüştürür. Bu mekanizmada her bir kuralın ateşleme derecesi aşağıdaki denklemlerle elde edilir.

$$F^i(x') = [f^i(x'), \bar{f}^i(x')] \equiv [f^i, \bar{f}^i] \quad (18)$$

$f^i(x')$ ve $\bar{f}^i(x')$ için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\begin{aligned} f^i(x') &= \mu_{\tilde{F}_1^i}(x'_1) * \dots * \mu_{\tilde{F}_p^i}(x'_p) \\ \bar{f}^i(x') &= \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^i}(x'_1) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{F}_p^i}(x'_p) \end{aligned} \quad (19)$$

Burada, * çarpım operatörüdür. Çıkarım mekanizmasından elde edilen tip-2 bulanık küme çıkışları tip-indirgeme işlemcisi sayesinde tip-1 bulanık kümelere dönüştürülür. Burada aralıklı kümelerin iki uç noktasının (y_r ve y_l) belirlenmesi gerekmektedir [16-20]. Bu noktalar çıkıştan önce elde edilir ve aşağıdaki hesaplanabilir.

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^9 f_l^i y_l^i}{\sum_{i=1}^9 f_l^i} \quad (20)$$
$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^9 f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^9 f_r^i}$$

Durulaştırıcı işlemcisinde ise tip-indirgeyiciden elde edilen tip-1 kümelere keskin çıkışlar Kernel-Mendel yöntemine göre uç noktaların ortalamasıyla aşağıdaki gibi elde edilebilir:

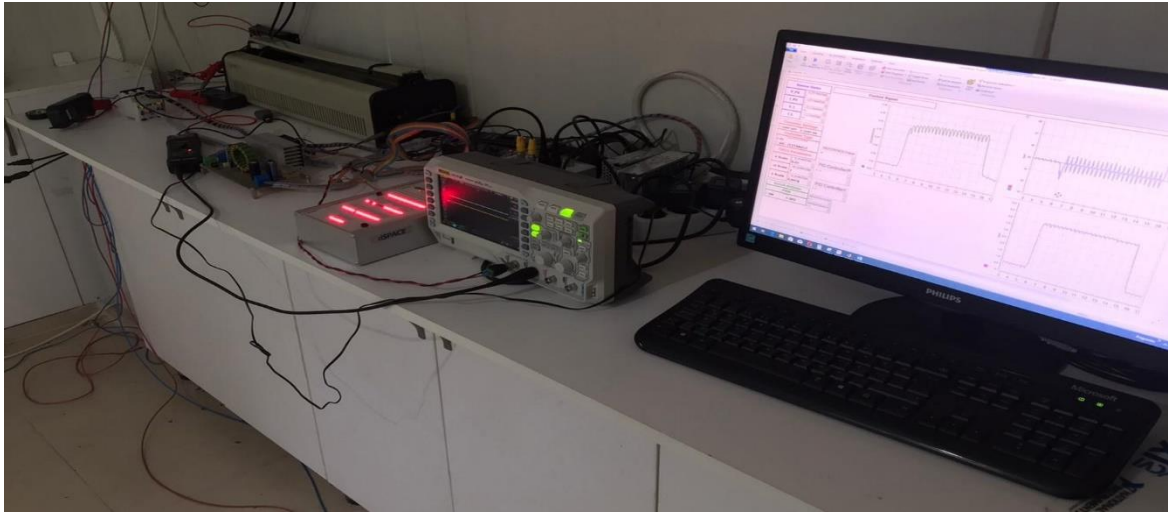
$$y = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (21)$$

IV. DENEYSEL KURULUM VE PERFORMANS ÇALIŞMALARI

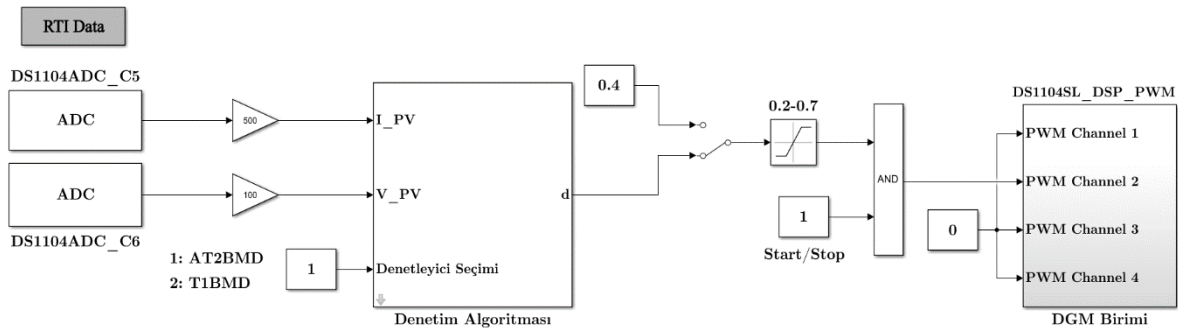
Önerilen denetleyici yapısının performansının test edilebilmesi için deneysel kurulum gerçekleştirilmiştir. Deneysel kurulum, güç devresi ve denetim algoritmasından oluşmaktadır. Güç devresi; DA-DA çeviriciyi beslemek için batarya, anahtarlama elemanı olarak IGBT, toroid nüveli bobin, kondansatör ve yük olarak reosta'dan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan elemanların değerleri Tablo 2'de verilmiştir. AT2BMD yapısının gerçek zamanlı çalışmalarda kullanılabilmesi için çok hızlı işlemcilerle sahip denetleyici kart gerekmektedir. Bu amaç için dSPACE DS1104 denetleyici kart kullanılmıştır. Bu denetleyici kart Matlab ile eşzamanlı olarak çalışabilmektedir. Böylece DA-DA çevirici için geliştirilen denetim algoritması devreye kolay bir şekilde entegre edilmiştir. Ayrıca DS1104 denetleyici kart yapısında bulunan *ControlDesk* arayüzü ile deneysel çalışmalardan elde edilen grafikler gerçek zamanlı olarak gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan batarya grubunun gerilim değeri yaklaşık olarak 27 V'tur. Bu gerilim ile DA-DA çevirici yapısı beslenmektedir. Denetim algoritmaları içinde kullanılan akım ve gerilim bilgileri diferansiyel akım ile gerilim problemleri aracılığıyla ölçülmüştür. Şekil 5'de deneysel çalışmalar için tasarlanan DA-DA çevirici yapısı gösterilmiştir. Ayrıca DA-DA çevirici için Matlab/RTI blokları ile gerçek zamanlı olarak çalışan model Şekil 6'da gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar için iki farklı senaryo düşünülmüş ve önerilen denetleyici yapısının performansı incelenmiştir.

Tablo 2. DA-DA çevirici devresinde kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme Türü	Özellikleri
Giriş Gerilimi	25 V
Çıkış Gerilimi	35-50
Bobin (L)	10 mH
Kapasitör	330 µF
IGBT	600V-23A
Hızlı diyot	600 V, 12 A
Yük Direnci	40-50 Ω
Anahtarlama Frekansı	20 kHz
Örnekleme zamanı	100 µs



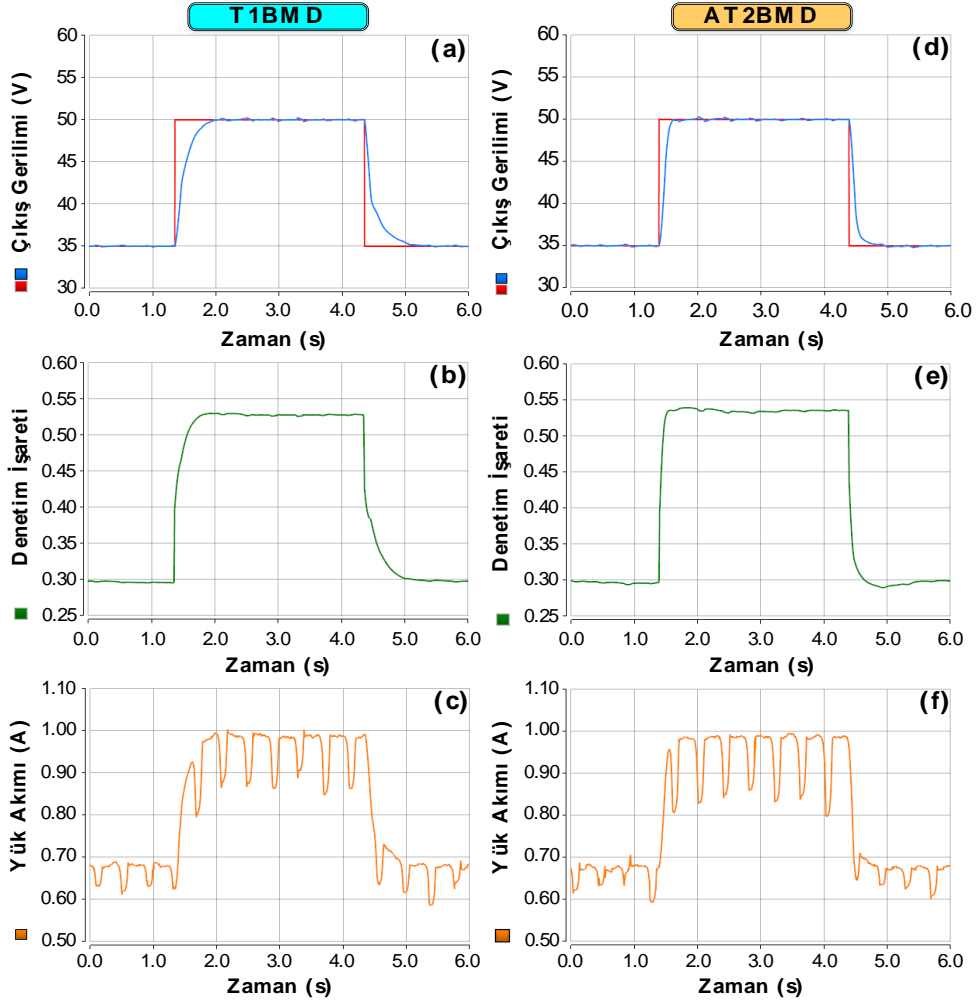
Şekil 5. DA-DA çeviricinin deneysel kurulumu



Şekil 6. DA-DA çevirici için geliştirilen Matlab/RTI modeli

A. Deneysel Çalışma-1: Referans Gerilim Değişimi

Bu çalışma referans giriş gerilimindeki değişimlere karşı önerilen denetleyicinin performansının incelenmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. AT2BMD'den elde edilen sonuçların daha adil bir şekilde değerlendirilebilmesi için T1BMD yapısı ile karşılaştırma yapılmıştır. İlk olarak batarya grubunun gerilimi 35 V'a yükseltilmiştir. Daha sonra DA-DA çevirici referans gerilimi $t=1.4$ sn'de 35 V'tan 50 V'ye $t=4.3$ sn'de ise 50 V'tan 35 V'a değiştirilmiştir. Bu şartlar altında elde edilen çıkış gerilimi, denetim sinyali ve çıkış akımına ait dalga şekilleri Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 (a ve d)'de görüldüğü gibi referans gerilim 35 V'tan 50 V'a yükseltildiğinde önerilen denetleyici yapısı 0.252 sn sonra referans hızı takip ederken T1BMD ise 0.612 sn sonra referans hızı yakalamıştır. Her iki denetleyici yapısı da bu gerilim değişiminde aşım yapmamıştır. Daha sonra referans gerilim değeri 50 V'tan 35 V'a düşürülmüştür. Yine çıkış gerilimleri ile ilgili şekiller detaylıca incelendiğinde önerilen denetleyici yapısı ve T1BMD'nin referans gerilimi yakalama süreleri sırasıyla 0.528 sn ve 0.852 sn olarak bulunmuştur. Ayrıca, her iki denetleyici yapısından elde edilen denetim işaretleri ise Şekil 7 (b-e)'de verilmiştir. Şekil 7 (c-f)'de ise DA-DA çeviricinin çıkışından elde edilen akıma ait dalga şekilleri sunulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde referans gerilim değişimlerinde yük üzerindeki akım değeri normal olarak artmıştır. Referans gerilim ilk değerine geldiğinde ise akım değeri de düşmektedir. Bu deneysel çalışmadan, AT2BMD'nin referans gerilim değişimlerine karşı daha hızlı dinamik cevaba sahip olduğu görülmektedir.

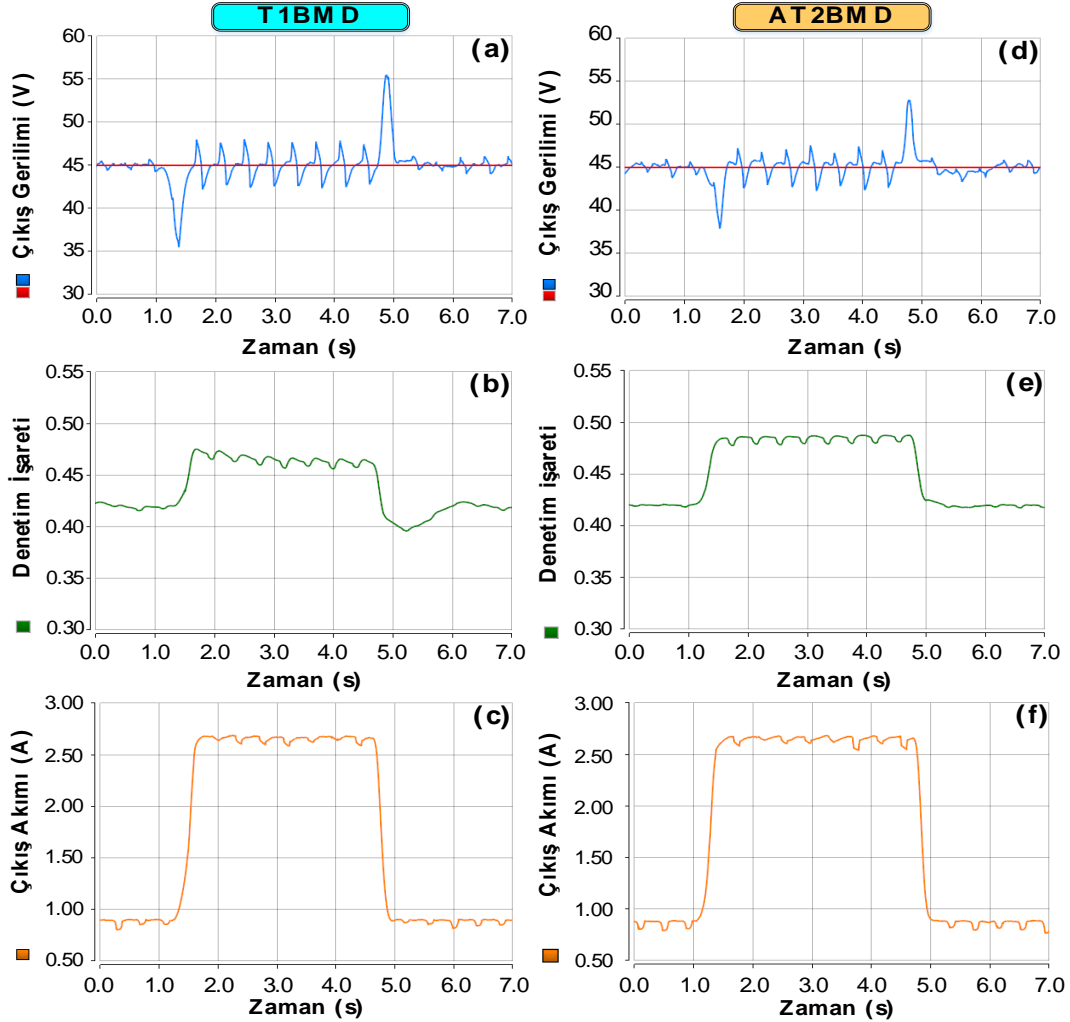


Şekil 7. Deneysel çalışma-1'den elde edilen sonuçlar

B. Deneysel Çalışma-2: Yük Değişimi

Bu deneysel çalışma, önerilen AT2BMD'nin yük değişimine karşı dinamik davranışını gözlemlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için ilk olarak çıkış gerilimi 45 V değerine ayarlanmıştır. Deneysel çalışma sonucundan elde edilen cevaplar Şekil 8'de verilmiştir. DA-DA çeviricinin çıkışına paralel olarak bağlanan resistif yükün değeri 50Ω 'dan 17Ω 'a değiştirilmiştir. Daha sonra ise yük direncinin değeri tekrardan 50Ω 'a getirilmiştir. Bu şartlar altında önerilen denetleyici yapısından ve T1BMD'den elde edilen gerilim cevapları Şekil 8 (a ve d)'de sunulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde yük değişimine karşı önerilen denetleyicinin gerilim cevabı yaklaşık 38.2 V değerine düşmüştür ve 0.348 sn sonra ise referans değerine ulaşmıştır. T1BMD'nin gerilim cevabı yaklaşık olarak 35.32 V'a anlık olarak düşmüş ve 0.636 sn sonrada daha önce ayarlanan referans DA gerilim değerini yakalamıştır. DA-DA çeviricinin her iki denetleyiciden elde edilen çıkış gerilim cevapları dikkatlice analiz edildiğinde dalgalanma bantları AT2BMD için 4.7 V iken T1BMD için 5.1 V olarak bulunmuştur. Denetleyici yapılarının denetim sinyalleri ise Şekil 8 (b-d)'de gösterilmiştir. Yük değişiminde denetim işaretlerinin de arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca bu çalışma koşulu altında yük direnci üzerindeki akımın değişimi Şekil 8 (c-f)'de sunulmuştur. Şekillerden de görüldüğü gibi akım değerleri 0.85 A'dan 2.65 A değerine yükselmiştir. Yükün devrede olduğu süre boyunca akım bu değerde kalmaktadır. Resistif yükün değeri eski durumuna getirildiğinde ise akım değeri de ilk başlangıçtaki değerine gelmektedir.

Bu çalışmadan ise anlık yük değişimleri durumunda önerilen denetleyiciden daha kararlı gerilim cevabının elde edildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Deneysel çalışma-2'den elde edilen sonuçlar

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yükselten tip DA-DA çevirici yapısının çıkış geriliminin dinamik cevabının iyileştirilmesi için AT2BMD önerilmiştir. Önerilen denetleyici yapısının davranışını analiz edebilmek için klasik denetleyiciler yerine T1BMD ile karşılaştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk olarak deneysel kurulum yapılmış ve deneysel denetim algoritmaları dSPACE DS1104 denetleyici kart yapısında geliştirilmiştir. Daha sonra ise birbirinden farklı iki deneysel çalışma durumları belirlenmiştir. İlk deneysel çalışmada referans DA gerilim değişimlerine karşı performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan önerilen denetleyici yapısının daha hızlı dinamik cevaba sahip olduğu gözlemlenmiştir. İkinci çalışmada ise yük değişimine karşı DA gerilimdeki değişimler incelenmiştir. AT2BMD yapısının daha iyi performans verilerine sahip olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır. Tüm deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında önerilen denetleyicinin DA-DA çevirici yapısının çıkış geriliminin denetiminde kullanılmasıyla daha tatmin edici dinamik cevapların elde edilebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Rashid, M.H. (2011). *Power electronics handbook*, Butterworth-Heinemann.
- [2] Bahtiyar, B., Çetin, M., Beyhan, S., İplikçi, S. (2018). An efficient sliding mode observer based model predictive control experimental implementation on a DC-DC power converter. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(8), 2488-2497.
- [3] Mamur, H., Ahiska, R. (2015). Application of DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, 97, 265-272.
- [4] Atacak, I., Bay, Ö. F. (2012). A Type-2 Fuzzy Logic Controller Design for Buck and Boost DC-DC converters, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23, 1023-1034.
- [5] Yatak, M.Ö., Bay, Ö.F. (2014). A Practical Application of the Interval Type-2 Fuzzy Controller for a Photovoltaic Sourced DC-DC Boost Converter, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 26, 3021-3035.
- [6] Keçecioglu, Ö. F. (2019). Robust control of high gain DC-DC converter using Type 2 fuzzy neural network controller for MPPT. *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, 37(1), 941-951.
- [7] Duranay, Z. B., Güldemir, H., Tuncer, S. (2018). Fuzzy Sliding Mode Control of DC-DC Boost Converter. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 8(3), 3054-3059.
- [8] Kececioglu O. F., Gani, A., Kılıç, E. (2019). Robust Control of Boost Converter Using Interval Type-2 TSK Fuzzy Logic Controller. *2nd Cilicia International Symposium on Engineering and Technology*, 1-5.
- [9] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information Control*, 8(3), 338-353.
- [10] Kumbasar, T. (2016). Aralık değerli tip-2 bulanık PID kontrolörler ve bir çevrimiçi öz-ayarlama mekanizması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(8), 643-649.
- [11] Acikgoz, H. (2018). Speed Control of DC Motor Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 6(3), 197-202.
- [12] Gani, A., Kececioglu, O. F., Acikgöz, H., Sekkeli, M. (2015). Uyarlamalı Bulanık PI Denetim Esaslı Dinamik Senkron Kompanzator ile Reaktif Güç Kompanzasyonu Benzetim Çalışması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2), 72-76.
- [13] Çöteli, R., Dandıl, B., Ata, F. (2011). Fuzzy PI Current Controlled D-STATCOM. *Gazi University Journal of Science*, 24(1), 91-99.
- [14] Zadeh, L. A. (1975). The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning-1. *Information Sciences*, 8(3), 199-249.
- [15] Acikgoz, H., Kececioglu, O. F., Karadol, I., Gani, A., Sekkeli, M. (2017). Adaptive Control of Solid State Transformer Using Type 2 Fuzzy Neural System. *Studies in Informatics and Control*, 26(2), 171-181.
- [16] Castillo, O., Melin, P., Sepu, R., Rodrı, A. (2007). Experimental study of intelligent controllers under uncertainty using type-1 and type-2 fuzzy logic. *Information Sciences*, 177, 2023-2048.
- [17] Mendel, J.M., John, R.I.B. (2002). Type-2 Fuzzy Sets Made Simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10, 117-127.
- [18] Hagraş, H. (2004). A hierarchical Type-2 Fuzzy Logic Control Architecture for Autonomous Mobile robots. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 12, 524-539.

- [19] Wu, H., Mendel, J.M. (2002). Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10(5), 622- 639.
- [20] Wu, D., Tan, W. W. (2006).A Simplified Type-2 Fuzzy Logic Controller for Real-Time Control. *ISA Transactions*, 45(4), 503-516.
- [21] Bennaoui, A., Saadi, S. (2017). Type-2 fuzzy logic PID controller and different uncertainties design for boost DC-DC converters. *Electrical Engineering*, 99(1), 203-211.
- [22] Seo, S., Choi, H.H. (2019). Digital Implementation of Fractional Order PID-Type Controller for Boost DC-DC Converter. *IEEE Access*, 7, 142652-142662.
- [23] Elmas, C., Deperlioglu, O., Sayan, H. (2009). Adaptive fuzzylogic controller for DC–DC converters. *Expert Systems with Applications*, 36(2):1540-1548.
- [24] Yazici, I., Kürsat, E. (2016). Fast and robust voltage control of DC-DC boost converter by using fast terminal sliding mode controller. *IET Power Electronics*, 9(1), 120–125.
- [25] Kim, S., Lee, K. (2015). Robust Feedback-Linearizing Output Voltage Regulator for DC/DC Boost Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), 7127-7135.
- [26] Karamanakos, P., Geyer, T., Manias, S. (2014). Direct Voltage Control of DC-DC Boost Converters Using Enumeration-Based Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 968–978.
- [27] Oucheriah, S., Guo, L. (2013). PWM-Based Adaptive Sliding-Mode Control for Boost DC- DC Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8), 3291-3294.
- [28] Wai, R., Shih, L. (2012). Adaptive Fuzzy-Neural-Network Design for Voltage Tracking Control of a DC-DC Boost Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(4), 2104-2115.
- [29] Cheng, K., Hsu, C., Lin, C., Lee, T., Li, C. (2007). Fuzzy-Neural Sliding-Mode Control for DC-DC Converters Using Asymmetric Gaussian Membership Functions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 54(3), 1528-1536.

Araştırma Makalesi - Research Article

AZ91, AS91 ve AM90 Magnezyum Alaşımlarının Aşınma ve Isıl Davranışları Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma

Birol Akyüz^{1*}

Geliş / Received: 13/10/2020

Kabul / Accepted: 25/10/2020

ÖZ

Bu makale, AZ91, AS91 ve AM90 (Mg-9Al-X) döküm magnezyum alaşımlarının aşınma direnci ve termal davranışları üzerine karşılaştırmalı bir çalışmadır. Bu alaşımlardaki üçüncü alaşım bileşenlerindeki değişimin (X; sırasıyla, 1 Zn, 1 Si, 0.5 Mn ve sabit 9 Al, % ağırlıkça) alaşımların aşınma direnci, ısıl özellikleri ve yoğunlukları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Alaşımların mikroyapısında bulunan intermetalik fazların (AZ91'de $Mg_{17}Al_{12}$, AS91'de Mg_2Si ve AM90'da Al_8Mn_5) sertlik, yoğunluk, aşınma direnci ve ısıl özellikler üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Alaşımların termal özellikleri artan sıcaklıkla artmıştır (sıcaklık değişimi 25 °C'den 400 °C'e kadar). En yüksek termal yayılma AZ91 alaşımında, en düşük termal yayılma ise AM90 alaşımında ölçülmüştür. Öte yandan, en yüksek aşınma direnci AM90'da gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- AZ91, AS91, AM90 Magnezyum Alaşımları, Aşınma, Termal Yayılma, Termal İletkenlik, Yoğunluk

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: birol.akyuz@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4462-3288>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 11200 Bilecik, Türkiye

A Comparative Study on Wear and Thermal Behaviors of AZ91, AS91 and AM90 Magnesium Alloys

ABSTRACT

This paper is a comparative study on wear resistance and thermal behaviors of AZ91, AS91 and AM90 (Mg-9Al-X) cast magnesium alloys. The effects of the changing in third alloy components (X;1 Zn, 1 Si, 0.5 Mn, respectively, and constant 9 Al, wt.%) in these alloys on wear resistance, thermal properties and densities were comparatively analyzed. It was seen that intermetallic phases ($Mg_{17}Al_{12}$ in AZ91, Mg_2Si in AS91 and Al_8Mn_5 in AM90) found in the microstructure of the alloys have an effect on hardness, densities, wear resistance and thermal properties. The thermal properties of the alloys were increase with increasing temperature (the temperature range from 25°C to 400°C). The highest thermal diffusivity were measured on AZ91 alloy and the lowest thermal diffusivity were measured on AM90 alloy. On the other hand, the highest wear resistance was observed in AM90.

Keywords- AZ91, AS91, AM90 Magnesium Alloys, Wear, Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity, Density

I. INTRODUCTION

Nowadays, there are numerous areas that use magnesium and its alloys because of their characteristics and these areas are growing day by day. This is especially due to being among the lightest structure metals for their density-strength properties. Magnesium alloys gain more importance in many fields, mostly in automotive, aerospace and logistics industries [1-3]. Their vast usage in various fields continues depending on improving its certain characteristics. Some of such characteristics to be improved are their mechanical properties, hardness, wear resistance, machinability and thermal properties. A large number of studies carried out on magnesium alloys were about obtaining different alloys and investigating the mechanical characteristics of such alloys [4-6]. Studies conducted on alloy properties affecting the improvement of wear characteristics of magnesium alloys and their correlation with thermal properties are few in number and insufficient. It is quite important to investigate the use of magnesium alloys in engine, piston and cylinders especially in automotive and aerospace industry and also its characteristics such as hardness, wear resistance, density and thermal properties (thermal diffusivity and thermal conductivity). It is known that wear resistance is related to alloy composition, microstructure and hardness of the material [4,6,9-11,14]. Wear can be defined as the resistance of metal against friction in its most basic sense. The most commonly used magnesium-aluminum (Mg-Al) alloys are AZ91, AM20, AM60, AS21, AS41 and AJ62 [1-26] etc. and their most significant properties are their well castability and improvable mechanical properties.

The influence of Al content on the machinability of AZ and AS series cast magnesium alloys were previously investigated [10, 23-27]. However, studies conducted on the thermal properties of magnesium alloys are few and insufficient. In literature, to the best of author's knowledge, there isn't any study found investigating the effect of the alloy component in the AZ91, AS91 and AM90 cast magnesium alloys comparing on the density, hardness, wear resistance and thermal behaviors/properties. Investigating the microstructure properties formed depending on alloy compositions, the effects of intermetallic phases on thermal properties, density, hardness and wear resistance were studied comparatively. This study is important within this scope.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The compositions of AZ91, AS91 and AM90 series cast magnesium alloys utilised in the study are listed in Table 1. These alloys contain 1 Zn, 1 Si and 0.5 Mn, respectively, and in constant 9 Al, wt.%. The samples casting and mechanical test details are well described by Ünal [15] and Akyüz [23-25].

Table 1. AZ91, AS91 and AM90 alloy composition (wt. %)

Alloys	Al	Zn	Si	Mn	Fe	Mg
AZ91	9.1	1.1	-	-	0.02	Rest
AS91	9.1	0.2	1.2	-	0.02	Rest
AM90	9.1	0.2	-	0.5	0.02	Rest

("A", "Z", "S" and "M", refers to the Al, Zn, Si and Mn content of the alloy, respectively.)

Microstructural surveys were conducted on the metallographic samples by optical light microscopy-OM (LV150 Nikon Eclipse). Furthermore, polishing and etching process details were explained in previous studies of the author [23-26]. XRD (X-ray diffraction) analyses were carried out under Cu K α radiation (Panalytical-Empyrean) with an incidence beam angle of 2°. The sample hardness values were obtained by Vickers hardness test (Shimadzu HMV-2) (on each sample at ten measurements in all tests). Wear resistance tests were performed (on each sample at four measurements in all tests by Tribotester TM, Clichy). Wear resistance test details are described in previous studies of the author [23-26]. Density of AZ91, AS91 and AM90 magnesium alloys was measured. The density was measured by the Archimedes method (He gas atmosphere, under 22 psi/1.5 pressure and in 10 cm³ specimen container). At least five measurements were obtained on each sample (15 mm in diameter and 18 mm in length). Then, density values of alloys were determined by averaging the values. Density tests were performed on tester (AccuPycII 1340 Pycnometer, Micromeritics Instrument Corp. U.S.A.).

The thermal diffusivity of AZ91, AS91 and AM90 series cast magnesium alloys were measured. The thermal diffusivity measurement was carried out the temperature range from 25°C to 400°C (with a NETZSCH model LFA 457 Laser Analysis, and Atmosphere N₂, gas flow 100.00 ml/min, more than 10 min. under isothermal conditions). Chunming at.al (2013) explained a comprehensive description the test sample standards and test procedures or process of the magnesium alloys [29]. The thermal conductivity was calculated using the following the equation:

$$\lambda = \alpha \rho c_p \quad (1)$$

Where λ is the thermal conductivity (λ : W · m⁻¹ K⁻¹), α is the thermal diffusivity (α : m² s⁻¹), ρ is the density (ρ : g cm⁻³) and c_p is the specific heat capacity (c_p : J g⁻¹ K⁻¹ accepted as fixed).

Lee at al 2013 [28] reported that the specific heat capacities of AZ31 and AZ61 are not significantly different due to the relatively small difference in aluminum quantities. The specific heat capacities of magnesium and aluminum at room temperature, 1.0241 Jg⁻¹K⁻¹ and 0.9025 Jg⁻¹K⁻¹, respectively, show very little difference [28]. Therefore, changes in the specific heat capacities of magnesium alloys for differing proportions of aluminum are insignificant. In this study, the specific heat capacity (c_p) is accepted as fixed.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Microstructure and XRD Pattern

Microstructure photographs and XRD patterns of the alloys used in the study are seen in Fig. 1 and Fig.2. The intermetallic phases could easily be distinguished from the matrix under the OM (seen on Fig.1). Microstructure of these Mg alloys analysed in the study was generally occurred to be made up of α Mg matrix and intermetallic phases. It was seen that the network formation of intermetallic phase in the alloys tended to surround α -Mg grains throughout the matrix [7,10]. In the alloys, beside from Mg₁₇Al₁₂ as an addition intermetallic phase, Mg₂Si intermetallic phase in AS91 and Al₈Mn₅ intermetallic phase in AM90 were observed/occurred. Mg₁₇Al₁₂ intermetallic phase was established in AZ91 alloy [10]. In AS91 alloy, Mg₂Si intermetallic phase was present along with Mg₁₇Al₁₂ intermetallic phase [8,24]. In AM90 alloy, Al₈Mn₅ intermetallic phase was observed in the alloy [6].

Previous studies showed the presence of Mg₁₇Al₁₂ intermetallic phase in AZ91 alloy [9,10,24,26]. The formation of Mg₁₇Al₁₂ phase was repeatedly reported due to changes of the solidification behavior of the melt caused by Zn addition [9,10,24,26]. In AS91 Mg alloys, the constitution of the matrix is α -Mg and the intermetallic phases (Mg₁₇Al₁₂ and Mg₂Si) were shown in Fig.1 and Fig.2. The formation of Mg₂Si phases in AS91 alloy appeared as in a form of Chinese script in accordance with the published literature [5-12 24,26]. Microstructure images and XRD pattern obtained in this study were in accordance with the literature [5-12,18-26].

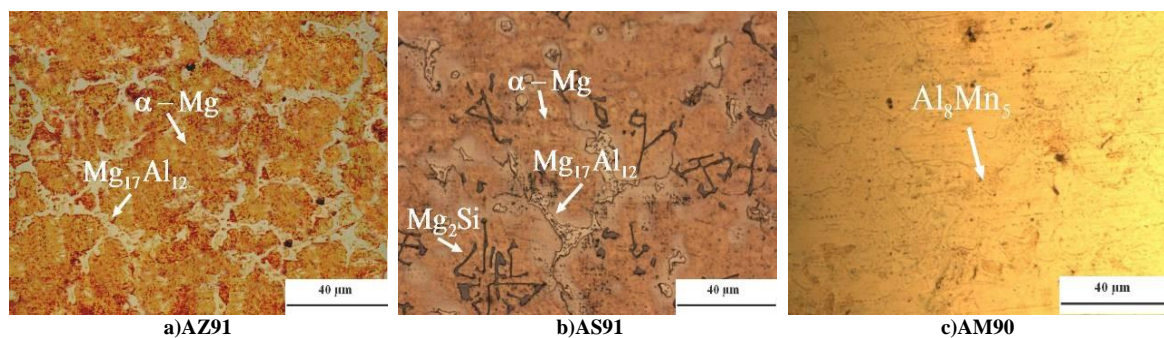


Figure 1. Optical Micrographs of AZ91, AS91 and AM90 magnesium alloys (50x).

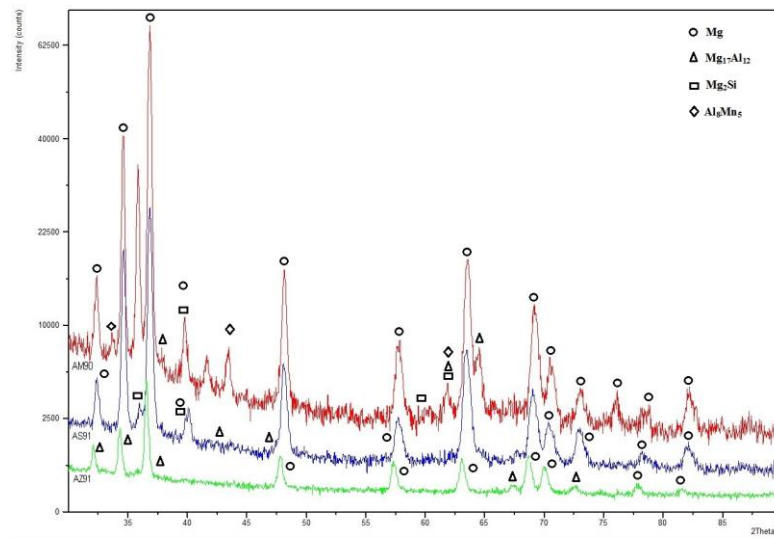


Figure 2. XRD patterns of AZ91, AS91 and AM90 magnesium alloys.

B. Hardness and Wear Resistance

Hardness and wear test results obtained from the alloys were given in Fig.3 and Fig 4. When checked, the mean hardness values of alloys were estimated as 60.8 HV₁₀ in AZ91 alloy, 68.7 HV₁₀ in AS91 alloy and 90.5 HV₁₀ in AM90 alloy. The highest hardness was obtained in AM90 alloy.

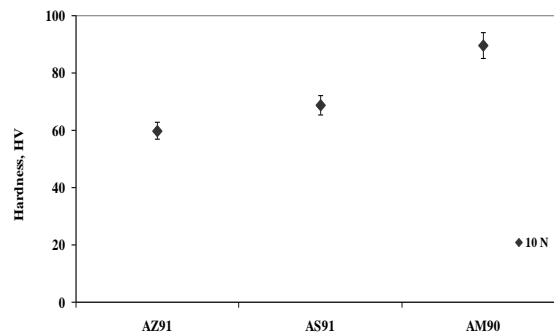


Figure 3. Hardness (HV) of AZ91, AS91 and AM90 magnesium alloys.

The relative wear resistance (RWR) values of these alloys were performed at AZ91, AS91 AM90. The RWR increase from AZ91 up to AM90 (Fig.4). It was observed that wear resistance was higher at rate of ~25% AS91 and ~29% AM90 when compared to AZ91 alloy (Fig.4a). The reason for the AM90 alloy demonstrating the highest hardness and also a wear resistance was due to the effects of the intermetallic phases ($Mg_{17}Al_{12}$ and Al_8Mn_5) found in the microstructure. There was no significant difference in the friction coefficients of the alloys (Fig. 4b). When the correlation between third alloy components (Zn, Si and Mn) and hardness and wear resistance in the experimental study analysed, it was observed that the hardness and wear resistance changed/increased depending on the third alloy components (Fig.3 and Fig.4).

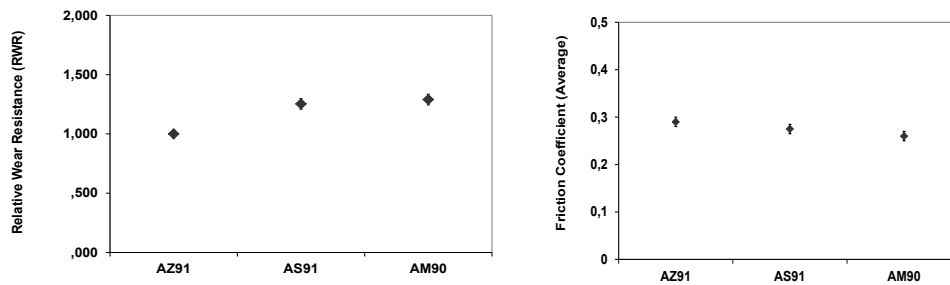


Figure 4. AZ91, AS91 and AM90 magnesium alloys (a) Wear resistance and (b) Friction coefficient (Average)

An evaluation of the results indicated that the intermetallic phases ($Mg_{17}Al_{12}$, Mg_2Si and Al_8Mn_5) could be very effective at hardening and also on wear resistance in these magnesium alloys. Results obtained from this section are in concordance with literature [7-16, 18-26].

C. Density and Thermal Properties

The thermal properties (thermal diffusivity and thermal conductivity) and the density values of AZ91, AS91 and AM90 series cast magnesium alloys are given in Fig.5 and Fig.6a-b. The density values of AZ91, AS91 and AM90 alloys are 1.762 g/cm^3 , 1.798 g/cm^3 and 1.843 g/cm^3 , respectively, (seen on Fig.5). The density of the alloys increases from AZ91 up to AM90 (Fig.5). The highest density was acquired from the AM90 alloy.

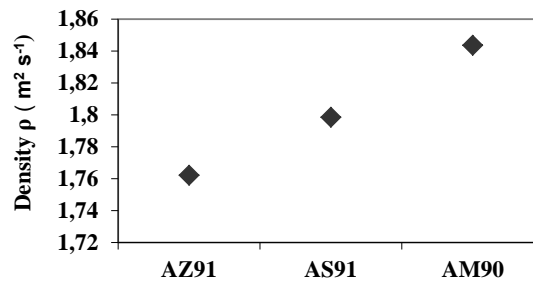


Figure 5. Density of AZ91, AS91 and AM90 magnesium alloys

Figure 6 shows the effect of microstructure variations on the thermal behaviors of the alloy samples as a function of the alloy content. Depending on the temperature increase (from 25°C to 400°C) in these alloys, increasing thermal diffusivity and thermal conductivity are observed (Fig.6a-b). While the highest thermal diffusivity and thermal conductivity (in all temperatures) were performed in AZ91 alloy, the lowest thermal properties (at all temperatures) were in AM90 alloy (seen on Fig.6a-b).

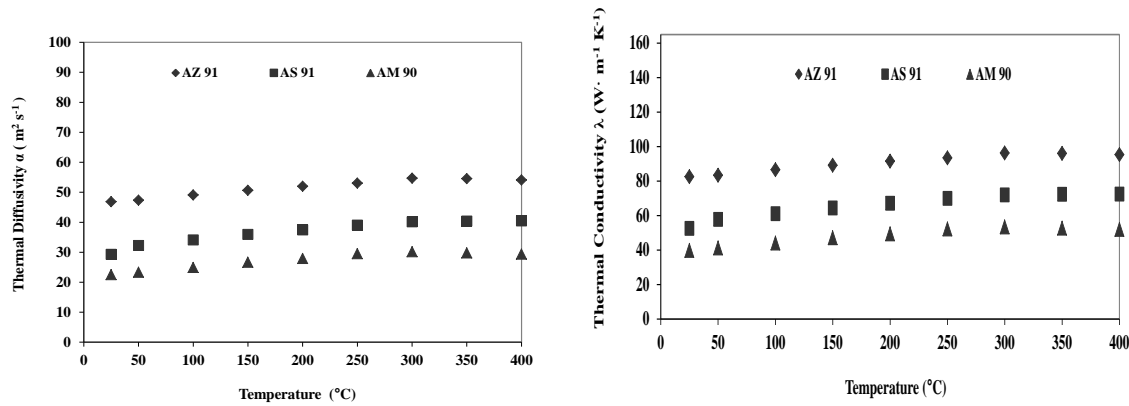


Figure 6. Thermal properties of AZ91, AS91 and AM90 Magnesium Alloys a) Thermal Diffusivity b) Thermal Conductivity

Considering the thermal diffusivity values of the alloys at 25 °C, the thermal diffusivity values of AZ91, AS91 and AM90 alloys are 46.86 m²/s, 29.33 m²/s and 22.51m²/s, respectively, (seen on Fig.6a). When the temperature is increased to 400 °C, thermal diffusivities are measured as 54.08 m²/s, 40.47 m²/s and 29.34 m²/s, respectively, (seen on Fig.6a). The thermal conductivity values of these alloys are 82.57 Wm⁻¹K⁻¹, 52.56 Wm⁻¹K⁻¹ and 39.85 Wm⁻¹K⁻¹ at 25 °C, respectively, (seen on Fig.6b). When the temperature is increased to 400 °C, thermal conductivity values are measured as 95.29 Wm⁻¹K⁻¹, 72.53 Wm⁻¹K⁻¹ and 51.94 Wm⁻¹K⁻¹, respectively, (seen on Fig.6b). The thermal behaviors/properties of AZ91, AS91 and AM90 alloys were increased ~%15, ~%38 and ~%30, respectively, depending on the temperature (from 25°C to 400°C) (seen on Fig.6a-b).

This experimental study results show that the intermetallic phases (Mg₁₇Al₁₂, Mg₂Si and Al₈Mn₅) found in microstructure of the alloys (consist of changing the third alloy component in the alloys; 1 Zn, 1 Si and 0.5 Mn and also constant 9 Al, wt.%) could be very effective on density, thermal behaviors/properties (thermal diffusivity and thermal conductivity), wear resistance and hardness as well. The highest thermal diffusivity were measured on AZ91 alloy (effect of Mg₁₇Al₁₂ intermetallic phase). Thus, it can be said that in increasing the thermal properties of the alloys, Mg₁₇Al₁₂ intermetallic phase (in AZ91) are the most positive effective than the Mg₂Si (in AS91) and Al₈Mn₅ (in AM90) intermetallic phases. Al₈Mn₅ intermetallic phase found in AM90 has a positive effect on hardness, densities and wear resistance, but negative effect on thermal diffusivity and thermal conductivity. The thermal properties all of the alloys were increase with increasing temperature (the temperature range from 25°C to 400°C). Results obtained from the study are in concordance with literature [7-16, 18-30].

IV. CONCLUSIONS

The results below were obtained from this experimental study;

- In AZ91, AS91 and AM90 series cast magnesium alloys, the alloy components (1 Zn, 1 Si and 0.5 Mn, respectively, and also 9 Al, wt. %) had an effect on the location and form of intermetallic phases.
- It was seen that the intermetallic phases (Mg₁₇Al₁₂ in AZ91, Mg₂Si in AS91 and Al₈Mn₅ in AM90) in the alloys had an effect on hardness, density, wear resistance and thermal properties.
- AZ91 alloy has the lowest hardness and wear resistance than compared to AS91 and AM90 alloy. On the other hand, the AZ91 alloy has the highest thermal properties. AM90 alloy has the highest hardness and wear resistance than compared to the others.
- Depending on the increase at temperature (from 25°C to 400°C) in the alloys, increases in the thermal diffusivity and thermal conductivity were observed. While the highest thermal diffusivity and thermal conductivity (in all temperatures) were performed in AZ91 alloy, the lowest thermal behaviors/properties (at all temperatures) were in AM90 alloy (Fig.6a-b).

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thanks to Bilecik Şeyh Edebali University for support (2013-02 BİL.03-01, 2016-02.BŞEÜ.03-02 and 2018-02.BŞEÜ.03-03).

REFERENCES

- [1] H.E. Friedrich, B.L. Mordike, (2006), *Magnesium Technology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [2] D.S. Mehta, S.H. Masood, W.Q. Song, (2004), *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156; 1526-1531.
- [3] H. K. Tönshoff, B. Denkena, R. J. Winkler, C. Podolsky, (2006), *Machining, Magnesium Technology, Metallurgy, Design Data, Applications*, (Ed. H. E. Friedrich and B. L.Mordike), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 398.
- [4] A. Srinivasan, K.K. Ajithkumar, J. Swaminathan, U.T.S. Pillai, B.C. Pai, (2013), Creep behavior of AZ91 magnesium alloy, *Procedia Engineering* 55; 109-113, *Procedia Engineering*, 55, 109-113.
- [5] C. Li-jie, M. Guo-rui, T. Chun-chong, (2012), Effects of isothermal process parameters on semisolid microstructure of Mg8%Al1%Si alloy *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22; 2364-2369, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22, 2364-2369.
- [6] M.Unal, (2008), An investigation of casting properties of magnesium alloys, Gazi University, Institute of Science And Technology, Ph.D. Thesis.
- [7] A. Srinivasan, J. Swaminathan, U.T.S. Pillai, K. Guguloth, B. Pai, C, (2008), Effect of combined addition of Si and Sb on the microstructure and creep properties of AZ91 magnesium alloy, *Materials Science and Engineering A*, 485; 86–91.
- [8] L. Xin-lin, C. Yan-bin, W. Xiang, M.A. Guo-rui, (2010), Effect of cooling rates on as-cast microstructures of Mg-9Al-xSi (x=1, 3) alloys, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 20; 393–396.
- [9] A. Srinivasan, J. Swaminathan, M.K. Gunjan, U.T.S. Pillai, B.C. Pai, (2010), Effect of intermetallic phases on the creep behavior of AZ91 magnesium alloy, *Materials Science and Engineering A*, 527: 1395–1403.
- [10] Akyüz, B., (2013), Influence of Al content on machinability of AZ series Mg alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume 23, Issue 8, p.2243-2249.
- [11] G.R. Ma, X.L. Li, L. Xiao, Q.F. Li, (2010), Effect of holding temperature on microstructure of an AS91 alloy during semisolid isothermal heat treatment, *Journal of Alloys and Compounds*, 496; 577–581.
- [12] M.S. Dargusch, A.L. Bowles, K. Pettersen, P. Bakke, G.L. Dunlop, (2004), The Effect of Silicon Content on the Microstructure and Creep Behavior in Die-Cast Magnesium AS Alloys, *Metalurgical and Materials Transactions A*, Volume 35A; 1905.
- [13] N. Tomac, K. Tønnesen, T. Mikac, (2008), Study of Influence of Aluminium Content on Machinability of Magnesium Alloys, *Strojarstvo*, 50 (6); 363 – 367.
- [14] X.L. Zhao, Y. Tang, W.J. Deng, F.Y. Zhang, (2007), Effect of Tool Flank Wear on the Orthogonal Cutting Process, *Key Engineering Materials*, Vol. 329; 705-710.
- [15] H.K. Tönshoff, J. Winkler, (1997), The influence of tool coatings in machining of magnesium, *Surface and Coating Technology*, 94-95; 610-616.
- [16] H.K. Tönshoff, T. Friemuth, J. Winkler, C. Podolsky, (2006), Improving the Characteristics of Magnesium

Workpieces by Burnishing Operations, Magnesium Alloys and their Applications, (Edited by K. U. Kainer)
WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 406.

- [17] K. Liu, X.P. Li, S.Y. Liang, (2007), The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials, *Int J Adv. Manuf. Technology*, 33, 875-884.
- [18] M. Ünal, (2014), Effects of solidification rate and Sb additions on microstructure and mechanical properties of as cast AM60 magnesium alloy, *International Journal of Cast Metals Research*, 27(2), 80-86.
- [19] M. Faruk, A. Özdemir, K.U. Kainer, N. Hort, (2013), Influence of Ce addition on microstructure and mechanical properties of high pressure die cast AM50 magnesium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(1), 66-72.
- [20] T. Tsuchiya, K. Watanabe, K. Matsuda, T. Kawabata, K. Sakakibara, T. Yamaguchi, S. Saikawa, S. Ikeno, (2012), Effect of Al and Mn Contents on Microstructure in AM-Series Magnesium Alloys, *Advanced Materials Research*, 409, pp 379-382.
- [21] A. Kielbus, T. Rzychoń, R. Cibis, (2006), Microstructural Characterisation of AZ91 Magnesium Alloy, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18(1-2), 135
- [22] Y. Ma, J. Zhang, M. Yang, (2009), Research on microstructure and alloy phases of AM50 magnesium alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 470(1), 515-521.
- [23] Akyüz, B., (2014), Influence of Aluminum Content on Machinability of AS Series Cast Magnesium Alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume 24, Issue 11, p.3452-3458.
- [24] Akyüz, B., (2014), Comparison of the machinability and wear properties of magnesium alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75 Issue 9-12, p1735-1742.
- [25] Akyüz, B., (2016), *Wear and machinability properties of AS series magnesium alloys*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 230.4: 701-709.
- [26] Akyüz, B., (2014), A study on wear and machinability of AZ series (AZ01-AZ91) cast magnesium alloys, *Kovove Materialy Metallic Materials*, Volume 52, Issue 5, p.255-262,
- [27] Akyüz, B., (2011), Machinability of Magnesium and Its Alloys, *The Online Journal of Science and Technology (TOJSAT)*, Vol.1 Iss.3.
- [28] Lee, S., Ham, H. J., Kwon, S. Y., Kim, S. W., Suh, C. M., (2013), Thermal conductivity of magnesium alloys in the temperature range from -125 °C to 400°C, *International Journal of Thermophysics*, 34(12), 2343-2350.
- [29] Chunming, W., Yungui, C., Sufen, X., Wucheng, D., Xia, L., (2013), Thermal Conductivity and Mechanical Properties of as-Cast Mg-3Zn-(0.5~ 3.5) Sn Alloys. *Rare Metal Materials and Engineering*, 42(10), 2019-2022.
- [30] Rudajevová, A., & Lukáč, P., (2005), Comparison of the thermal properties of AM20 and AS21 magnesium alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 397(1-2), 16-21.

Araştırma Makalesi - Research Article

Mikro Silika Dolgulu Yüksek Dayanımlı Betonun Mekanik Özelliklerine Ön Isıtmanın Etkisi

Ibrahim Alameri^{1*}, Meral Oltulu², Metehan Ardahanlı³

Geliş / Received: 30/05/2020

Revize / Revised: 22/08/2020

Kabul / Accepted: 22/09/2020

ÖZ

Silis dumanı içeren betonun erken yaş sıcaklığı, silis dumanı yüzeyinin hızlı reaksiyon gösterme ve mukavemeti artırma eğilimi nedeniyle çok önemlidir. Kür metodu geçirimsizliği, dayanımı ve durabiliteyi doğrudan etkiler. Bu çalışmada farklı oranlarda silis dumanı içeren betonların basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı 2 kür metodunda araştırılmıştır. Basınç dayanımı için $15 \times 15 \times 15$ cm küp numuneler, çekme deneyi için 10×20 cm silindir numuneler ve eğilme dayanımı için $7 \times 7 \times 28$ cm kiriş numuneler olmak üzere 3 farklı kalıp kullanılmıştır. Silis dumanı ağırlıkça çimento yerine mineral katkı olarak %8, %10, %12 oranlarında kullanılmıştır. Deney için 2 grup hazırlanmış olup birinci grup 4 hafta su küründe iken ikinci grup ise 1 gün boyunca 75°C 'de ön ısıtma etkisinde ve sonrasında 4 hafta su küründe tutulmuştur. Slump testi kullanılarak taze beton özellikleri araştırıldığında en yüksek slump değerinin ve basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımında da en iyi sonuçların %10 silis dumanı içeren numunelerde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- *Ön Isıtma, Silis Dumanı, Yüksek Dayanımlı Beton, Basınç Dayanımı, Çekme Dayanımı*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: i.ameri@eng-su.com (<https://orcid.org/0000-0002-4921-3213>)

Civil Eng. Dept., Ataturk University, Erzurum, Turkey

Civil Eng. Dept., Sana'a University, Sana'a, Yemen

²İletişim: mroltulu@atauni.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3779-6888>)

Civil Eng. Dept., Ataturk University, Erzurum, Turkey

³İletişim: metehan.ardahanli@erzurum.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8091-2792>)

Civil Eng. Dept., Erzurum Technical University, Erzurum, Turkey

Influence of Preheating on the Mechanical Properties of High Strength Concrete with Micro Silica Filler

ABSTRACT

The early-age temperature of concrete containing silica fume is very important due to the tendency of the silica-fume surface to react quickly and increase strength. The curing method directly affects the permeability, strength, and durability of concrete. In this study, the effects of preheating on the compressive, splitting tensile and flexural tensile strengths of concrete with different ratios of silica fume were investigated. Three different mold type samples were used: $15 \times 15 \times 15$ cm cube samples for the compression test, 10×20 cm cylinder samples for the tensile test, and $7 \times 7 \times 28$ cm beam samples for the bending tensile strength test. As a mineral additive, silica fume was replaced by 8%, 10%, and 12% by weight of cement. Two groups were prepared for the test, group A was left in water for 4 weeks, group B was preheated for 1 day at 75°C , and then left in water for 4 weeks. The results showed that the best addition of silica fume was 10%, which increased workability and reduced the effect of early-age temperature.

Keywords- *Preheating, Silica Fume, High Compressive Concrete, Compressive Strength, Tensile Strength*

I. INTRODUCTION

In the past few decades, structural and economic pressures to speed up construction project delivery have emphasized the need to estimate the early strength gain of concrete. Such a prediction is important for cold and hot weather conditions, and large concrete elements. In large concrete elements, the temperature gradient between the interior and the exterior surfaces is large and varies with age. Therefore, it is practically important to control the temperature at early ages to reduce crack formation caused by thermal shrinkage [1]. Curing temperature affects the early-age [2-5] and late-age strength of concrete [6,7]. Schachinger et al. [8] concluded that concrete subjected to 90°C early-age temperature for 24 to 48 hours caused an increase in the compressive strength. The reason for the increase in strength was mainly due to the pozzolanic reaction of silica fume with $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Son and Hosoda [9] examined microcracks in concrete exposed to early-age temperatures of 5°C and 40°C. The results showed that temperatures at an early-age caused higher strength concrete at early-ages, but eventually reached lower strength at late-ages. Kim et al. [10] studied concretes containing different types of cement and fly ash, cured in isothermal conditions up to 50°C, and tested at different ages. They concluded that early-age temperature increased the compressive and tensile strengths at the early-age, but decreased the late-age compressive and splitting tensile strengths. Lin et al. [11] investigated the residual compressive strength of concrete cured in water after exposure to high temperatures. The findings of the study revealed that early-age temperatures significantly affected the residual strength.

The use of wastes, such as fly ash, silica fume, marble dust, and red mud from various industrial plants is widely used in concrete and cement technology. These wastes prevent environmental pollution and contribute positively to the economy and durability of concrete. [12-17]. Adding silica fume to cement concrete increases the compressive strength and other mechanical properties of the concrete. These improvements are due to the closed packing achieved in the cement paste system, which reduces the total porosity and improves the interfacial transition zone [18]. Furthermore, the pozzolanic reaction with the calcium hydroxide crystals producing additional calcium-silicate-hydrate (C-S-H) and eliminating areas of stress concentrations and prone to failure initiation $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystals [11]. Based on the aforementioned advantages of adding silica fume to concrete, many studies have been conducted to evaluate the optimum ratio of silica fume in concrete. To produce a high strength concrete, silica fume was replaced by 5-20% of cement weight [19]. Tohumcu and Bingöl [20] produced a self-compacted concrete (SCC) using 5%, 10% and 15% of silica fume, and 25%, 40% and 55% of fly ash. The results showed that the highest compressive strength was observed in concrete samples containing 15% silica fume. Demir [21] replaced silica fume and fly ash in concrete by 5, 10, 15, 20 and 25%. The results showed that when 20% silica fume was added to concrete, the best compressive and tensile strength were obtained.

Successful addition of silica fume into cement composites will enhance the performance under preheating at early-ages. In this evaluation, silica fume particles were used as additives for a high strength cement concrete at different proportions. Two curing methods were applied. In the first group, the concrete was left in water for 4 weeks, while in the second group, concrete was subjected to a preheating temperature of 75°C for 1 day after that left in water for 4 weeks. The mechanical properties of the preheated cement concrete samples were thoroughly evaluated and compared to the first group. The mixing design, testing procedures, and test results are discussed in detail in the following sections.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Materials

In this study, CEM II/A-M 42.5R ordinary Portland cement compliance with the Turkish standard TS EN 197-1 [22] and TS EN 196-1 [23] was used. These standards are compatible with European standards. The chemical and index properties cement and silica fume used are summarized in Table 1. To increase the workability of concrete a modified polycarboxylate superplasticizer was added to the mixture by 2% of the cement weight. The specific gravity of the aggregates was carried out in accordance with Turkish standard TS EN 1097-6 [24] and the results are summarized in Table 2. Figure 1 shows the granulometry of the aggregate used in this study.

Table 1. Index and chemical properties of cement

Chemical composition (%)	CEM II/A-M 42.5R	Silica fume (SF)
SiO ₂	17.60	88.8
Al ₂ O ₃	4.45	0.17
Fe ₂ O ₃	3.08	0.11
CaO	60.02	1.01
MgO	2.29	0.88
SO ₃	2.67	0.42
Loss on ignition	8.49	2.40
Na ₂ O	0.22	0.19
K ₂ O	0.63	5.08
Na ₂ O+0,658K ₂ O	0.63	-
Cl	0.01	-
Unmeasured	0.54	1.48
Free CaO	0.69	-
Total additives	19.90	-
Index properties		
Specific gravity	3.01	2.36
Specific surface (cm ² /g)	4403	302
Compressive strength (MPa)	51.03	-

Table 2. Properties of aggregate

Aggregate size (mm)	Specific Gravity
0-2	2.610
2-4	2.650
4-8	2.661
8-16	2.685

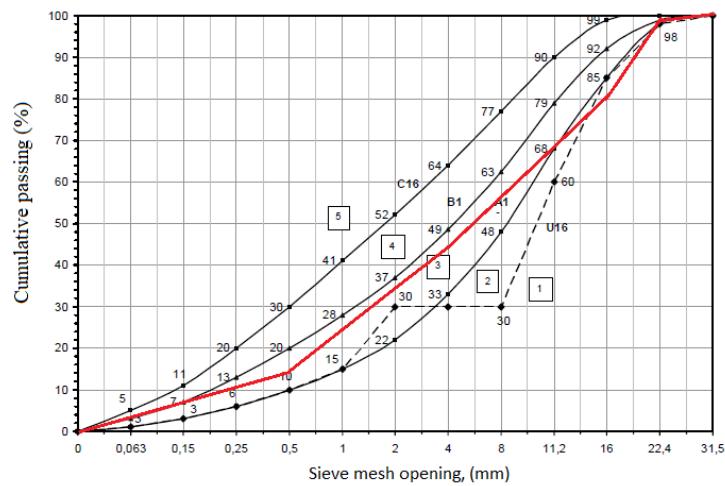


Figure 1. Aggregate granulometry

B. Concrete Mix Design

In this study, the concrete was designed according to the Turkish Standard TS EN 206 [25]. The samples were cast by replacing the cement weight with 8%, 10%, and 12% silica fume. According to preliminary experimental works to produce a high strength concrete, the water/binder ratio was 0.276 and the water reducing additives superplasticizers was 2% by weight of cement. These ratios provided proper workability with minimum consistency. Three different mixing ratio groups were cast to produce 15 × 15 × 15 cm cube samples for compressive test, 10 × 20 cm cylinder samples for splitting tensile test and 7 × 7 × 28 cm beam samples for flexural

strength test. The mix ratios are summarized in Table 3. The amount of aggregate, W/C and superplasticizer ratios were kept constant because the quantity of silica fume added was slightly different.

Table 3. Concrete mix proportions

Group	C	SF	Aggregate				W	SP's
			0-2 (mm)	2-4 (mm)	4-8 (mm)	8-16 (mm)		
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	(%) by weight of cement
SF (8%)	460	40	616	179	628	363	138	2
SF (10%)	450	50	616	179	627	362	138	2
SF (12%)	440	60	616	179	627	362	138	2

C. Experiments

1. *Concrete Slump Test:* The concrete slump test is performed to determine the workability of fresh concrete, which is an important factor to find the consistency amount of water. In this study, the fresh concrete properties were made according to TS EN 12350-2 [26]. The slump values were measured using a standard slump cone apparatus.

2. *Compressive, Splitting, And Flexural Tensile Tests:* Compressive strength, splitting tensile and flexural tensile strength of samples were determined using ELE brand AUTOTEST with 300 tons capacity. The loading rates were 0.4 MPa/s, 0.02 MPa, and 0.04 MPa for compressive strength, splitting tensile and flexural tensile strengths, respectively. This loading rate is within the range specified in TS 12390-3, TS EN 12390-6, and TS EN 12390-5 [27-29].

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Concrete Slump Test

Chemical and mineral additives directly affect the properties of fresh concrete. In this study, superplasticizer as a chemical additive and silica fume as a mineral additive was used. Base on the preliminary experimental works to produce a high strength concrete, the water/binder ratio was 0.276 and the water reducing additives superplasticizers was 2% by weight of cement. These ratios provided proper workability with minimum consistency. The results of the slump test are listed in Table 4. All slump test values are in the range of 1-4 cm and indicate S1 class according to TS EN 12350-2 [26]. The slump of all groups was approximately the same with a small increase in groups containing 10% silica fume.

B. Compressive Strength Test

The compressive strength values of concrete are shown in Figure 2 and Table 4. In cure A, it was observed that the strength was inversely proportional to the amount of silica fume. This decrease in strength with the increase in the amount of silica fume may be explained due to the decrease in the amount of cement, which means that the CH formation in the concrete was reduced and produced less C-S-H gel despite pumice pozzolanic properties. On the other hand, curing B showed an increase in compressive strength as the amount of silica fume increased. The reason is that preheating at early ages accelerated the pozzolanic reaction of silica fume with Ca(OH)₂ [30,31]. Samples containing 12% silica fume preheated at an early age showed a 13% increase in compressive strength in comparison to normal curing. This indicates that the compressive strength of concrete can be increased by preheating at an early-age [32,33].

Table 4. Test results

Group	Slump (cm)	Compressive strength (MPa)		Splitting tensile strength (MPa)		Flexural tensile strength (MPa)	
		Cure A	Cure B	Cure A	Cure B	Cure A	Cure B
8% SF	2.0	59.9	45.6	3.7	1.8	8.6	7.6
10% SF	3.0	53.7	47.5	3.9	3.1	8.2	8.9
12% SF	2.0	45.1	50.8	3.7	2.5	7.0	6.0

Cure A: Placed in water for 4 weeks.

Cure B: Placed in the oven at 75 C° for 1 day then in water for 4 weeks

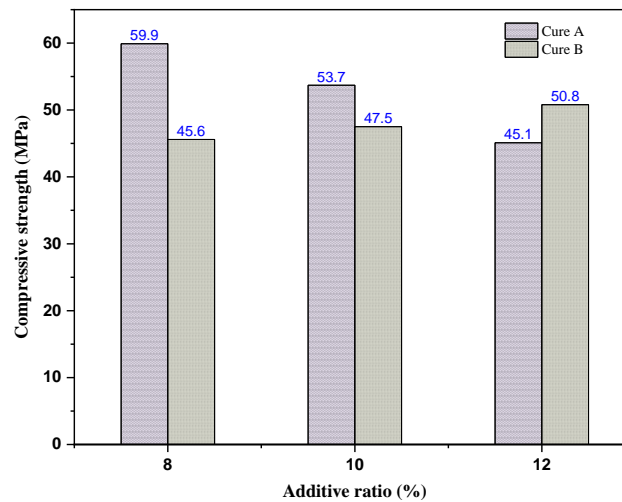


Figure 2. Compressive strength results

C. Splitting Tensile Test

According to the splitting tensile test results shown in Figure 3 and Table 4, the highest splitting tensile strength was obtained at 10% silica fume for both curing conditions. The increase in the splitting tensile in this ratio was because of the increase in the slump value. Concrete with high slump value indicates a more compact matrix with fewer amounts of voids. Adding more than 10% silica fume reduced the amount of cement that caused the reduction of CH formation in concrete and thus produced less C-S-H gels, despite having pozzolanic properties.

The results showed that the cure A samples were higher than cure B. This demonstrated that the curing condition clearly affected the strength of concrete. In comparison to the cure A samples, the cure B samples containing 8%, 10% and 12% silica fume showed a reduction in splitting tensile strength of 51.4%, 20.5%, and 32.4%, respectively. The splitting tensile strength results showed that under both curing conditions, the best proportion was 10% silica fume. These results were the same as the compressive strength results. The increase in splitting tensile at this ratio may be explained by the fact that pumice exhibits more pozzolanic activity in late curing ages and reacts with CH formed as a result of hydration of cement to form new C-S-H gels.

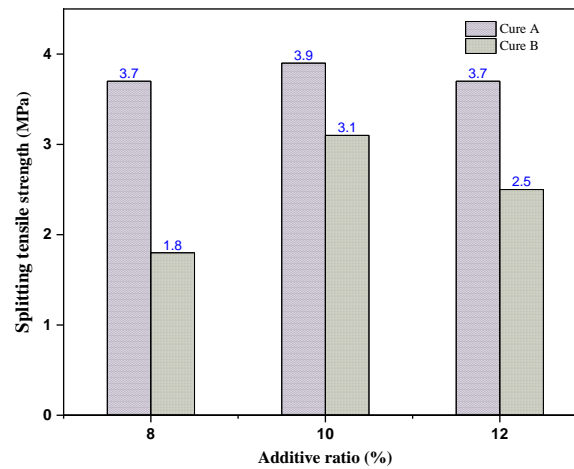


Figure 3. Splitting tensile results

D. Flexural Tensile Test

Figure 4 and Table 4 show the flexural tensile test results for both cure A and cure B. The results showed that the flexural tensile strength was inversely proportional to the additive ratios in the cure A samples. On the other hand, in cure B samples, the highest strength was seen in concrete containing 10% silica fume. The strength of 10% silica fume was maximum for both cure A and cure B. Also, at this rate cure B showed a clear increase in strength, even more than cure A. This result shows that the flexural strength of concrete containing silica fume can be increased by preheating the concrete at an early age.

The increase in the performance of concrete containing 10% silica fume was convenient with the results obtained in compressive and splitting tensile strength tests. Moreover, as mentioned before, the increase in the flexural tensile for samples containing 10% silica fume can be explained by the high slump value, which means fewer voids, and the pozzolanic activity in advanced curing ages which reacts with CH formed as a result of hydration of cement to form new C-S-H gels. Nevertheless, in the high additive ratios a decrease was observed because of the decrease in cement amount, CH formation in concrete decreased and thus pumice produced less C-S-H gel despite having pozzolanic property.

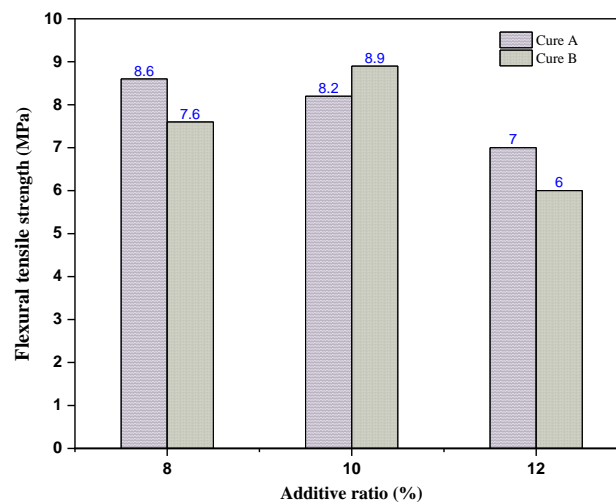


Figure 4. Flexural tensile results

IV. CONCLUSION

This present study compared the effect of the curing method for concrete containing silica fume on the basis of compressive, splitting tensile, and flexural tensile tests. Based on the results of this study, the following conclusions were reached:

- The slump of all groups was approximately the same with a little increase in groups containing 10% silica fume.
- Addition of silica fume to concrete decreased the compressive strength of concrete in curing A samples, while in samples subjected to preheating temperature (curing B) at an early age, the compressive strength increased as the amount of silica fume increased.
- Samples containing 12% silica fume, when subjected to preheating temperature (cure B) at an early age, showed much higher compressive strength values than water cured (cure A).
- The highest tensile and flexural strength was obtained at 10% silica fume for both curing conditions.

Further recommended studies include:

- The durability properties such as freeze-thaw, chemical attack, and abrasion of the concrete containing silica fume exposed to early-age temperature,
- Detailed microstructural and pore structure studies are recommended on the subject (e.g. SEM, XRD and TGA) in order to determine the mechanism by which silica fume acts, as a partial replacement when exposed to preheating temperatures,
- Different curing methods with different temperatures besides different pozzolanic materials,
- The effect of silica fume on concrete exposed to high temperatures at late-ages.

REFERENCES

- [1] Kim, J.K., Moon, Y.H., & Eo, S.-H. (1998). *Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature*. Cement and Concrete Research, 28(12), 1761–1773.
- [2] Husem, M., & Gozutok, S. (2005). *The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete*. Construction and Building Materials, 19(1), 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.033>
- [3] Park, J.S., Kim, Y. J., Cho, J.-R., & Jeon, S.-J. (2015). *Early-Age Strength of Ultra-High Performance Concrete in Various Curing Conditions*. Materials, 8(8), 5537–5553. <https://doi.org/10.3390/ma8085261>
- [4] Pichler, Ch., Schmid, M., Traxl, R., & Lackner, R. (2017). *Influence of curing temperature dependent microstructure on early-age concrete strength development*. Cement and Concrete Research, 102, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.022>
- [5] Yang, K.H., Mun, J.S., & Cho, M.-S. (2015, June 4). *Effect of Curing Temperature Histories on the Compressive Strength Development of High-Strength Concrete [Research Article]*. Advances in Materials Science and Engineering; Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2015/965471>
- [6] Singh, H. (2020). *Effect of Curing on The Compressive Strength of High Strength Concrete*. International Journal of Advanced Science and Technology, 29(10s), 6019–6022.
- [7] Tan, K., & Gjørsv, O. E. (1996). *Performance of concrete under different curing conditions*. Cement and Concrete Research, 26(3), 355–361. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85023-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85023-X)

- [8] Schachinger, I., Hilbig, H., Stengel, T., & Fehling, E. (2008). *Effect of curing temperature at an early age on the long-term strength development of UHPC*. In 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 10, 205-213.
- [9] Son, H. N., & Hosoda, A. (2010). *Detection of Microcracking in Concrete Subjected to Elevated Temperature at Very Early Age by Acoustic Emission*. Journal of Advanced Concrete Technology, 8(2), 201–211.
- [10] Kim, J. K., Han, S. H., & Song, Y. C. (2002). *Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results*. Cement and Concrete research, 32(7), 1087-1094.
- [11] Lin, Y., Hsiao, C., Yang, H., & Lin, Y. F. (2011). *The effect of post-fire-curing on strength–velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength*. Fire Safety Journal, 46(4), 178-185.
- [12] Topçu, İ. B., & Kaval, M. (2001). *Betonda Silis Dumanı Kullanımının Ekonomik Analizi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(1), 18-31.
- [13] Onuaguluchi, O., & Panesar, D. K. (2014). *Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume*. Journal of Cleaner Production, 82, 125-131.
- [14] Oltulu, M., & Alameri, I. (2019). *The mechanical properties of concrete with red mud (Bauxite Residue) and nano- Al_2O_3 at high temperatures*. Feb-Fresenius Environmental Bulletin, 28(6), 4692-4701.
- [15] Das, S. K., Singh, S. K., Mishra, J., & Mustakim, S. M. (2020). *Effect of Rice Husk Ash and Silica Fume as Strength-Enhancing Materials on Properties of Modern Concrete—A Comprehensive Review*. In Emerging Trends in Civil Engineering, 253-266.
- [16] Alameri, I., & Oltulu, M. (2020). *Mechanical properties of polymer composites reinforced by silica-based materials of various sizes*. Applied Nanoscience. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01516-6>
- [17] Alameri, I., & Oltulu, M. (2019). *The effect of high temperatures on the properties of hardened concrete with bauxite residue materials*. MAS International Conference on Mathematics-Engineering-Natural & Medical Sciences, Erzurum, Turkey.
- [18] Constantinides, G. (2013). *2—Nanoscience and nanoengineering of cement-based materials*. In F. Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, A. Nazari, & C.G. Granqvist (Eds.), Nanotechnology in Eco-Efficient Construction (pp. 9–37a). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098832.1.7>
- [19] Şimşek, O., Dur, A., Yaprak H. (2004). *Properties of mortars added silica fume and superplasticizer*. Journal of Polytechnic, 7(2), 169-178.
- [20] Tohumcu, İ., Bingöl A. F. (2013). *Fresh concrete properties and compressive strength of self-compacting concretes with silica fume and fly ash*. DEÜ mühendislik fakültesi Mühendislik bilimleri dergisi, 15(2), 31-44.
- [21] Demir, İ. (2009). *Aynı Oranlarda İkame Edilen Silis Dumanı ve Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi*. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 1(2), 1-7.
- [22] TS EN. (2002). 197-1, Turkish standard for cement-part 1: compositions and conformity criteria for common cements. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, Turkey.
- [23] TS EN. (2005). 196-1, Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Turkey.
- [24] TS EN. (2002). 1097–6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Turkey.

- [25] TS EN. (2017). TS EN 206, A1: Beton-Özellik, performans, imalât ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Turkey
- [26] TS EN. (2019). 12350-2, Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Turkey.
- [27] TS EN. (2010). 12390-3, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımını Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Turkey.
- [28] TS EN. (2010). 12390-6, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Turkey.
- [29] TS EN (2019).12390-5, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Turkey.
- [30] Kwon, Y.-H., Kang, S.-H., Hong, S.-G., & Moon, J. (2017). *Acceleration of Intended Pozzolanic Reaction under Initial Thermal Treatment for Developing Cementless Fly Ash Based Mortar*. Materials, 10(3). <https://doi.org/10.3390/ma10030225>
- [31] Zhang, Z., Zhang, B., & Yan, P. (2016). *Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures*. Construction and Building Materials, 121, 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.014>
- [32] Ardahanlı M, Oltulu M, Alameri I (2019). *Evaluation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing fly ash subjected to early-age temperature*. Hoca Ahmet Yesevi 2. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Erzurum, Turkey.
- [33] Alameri I, Oltulu M, Ardahanlı M (2019). *Effect of early-age temperature on the behavior of concrete containing silica fume*. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Turkey.

Araştırma Makalesi - Research Article

Roof-KSA: Binaların Semantik Bölütlemesi İçin Az Parametreye Sahip Konvolüsyonel Sinir Ağı Modeli

Umut Özkaya^{1*}, Şaban Öztürk²

Geliş / Received: 23/05/2020

Revize / Revised: 24/09/2020

Kabul / Accepted: 05/10/2020

ÖZ

Günümüzde güneş enerjisi, enerji alt yapısının sağlanmasında vazgeçilmez bir unsur haline gelmiştir. Yerleşim yerlerinde bulunan bina çatılarının güneş enerjisi potansiyelinin tahmin edilebilmesi bu enerjinin etkin kullanılabilmesi için önemlidir. Günümüzde yapay zeka algoritmalarındaki gelişmeler sayesinde bu gibi işler bilgisayarlar tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada ise yapay zeka algoritmalarının en gelişmiş olan derin öğrenme mimarilerinden faydalanarak bir çözüm önerilmektedir. Bu çalışmada bina çatılarının semantik bölütlenmesi için az parametreye sahip Roof-KSA adı verilen Konvolüsyonel Sinir Ağı modeli önerilmiştir. Semantik bölütleme işlemi için toplamda 3400 adet 224×224×3 piksel boyutlarında uydu görüntülerinden yararlanılmıştır. Roof-KSA modeli toplam 10 katmana ve 104,450 adet güncellenebilen parametreye sahiptir. Karşılaştırmalı analiz kapsamında Roof-KSA modeli kullanılan U-Net modellerine göre oldukça az parametreye sahiptir. Ayrıca Roof-KSA modeli 0.91404 küresel doğruluk oranı, 0.73092 ortalama doğruluk oranı, 0.65537 ortalama eşleşmiş bölge oranı, 0.84918 ağırlıklandırılmış eşleşmiş bölge oranı ve 0.67244 ortalama BF skoru ile ön plana çıkmaktadır. Elde edilen semantik bölütleme sonuçları dikkate alındığında Roof-KSA modelinin oldukça başarılı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler- Güneş Enerjisi, Derin Öğrenme, Semantik Bölütleme, Konvolüsyonel Sinir Ağları

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: uozkaya@ktun.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9244-0024>)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye

²İletişim: saban.ozturk@amasya.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2371-8173>)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Amasya Üniversitesi, Amasya, Türkiye

Roof-CNN: Convolutional Neural Network Model with Less Parameters for Semantic Segmentation of Buildings

ABSTRACT

Today, solar energy has become an indispensable element in providing energy infrastructure. Estimating the solar energy potential of building roofs in residential areas is important for the effective use of this energy. Nowadays, thanks to the developments in artificial intelligence algorithms, these tasks are performed automatically by computers. In this study, a solution is proposed by using deep learning architectures, which are the most advanced artificial intelligence algorithms. Convolutional Neural Network model called Roof-KSA with less parameters was proposed for semantic segmentation of building roofs in this research. A total of 3400 satellite images in $224 \times 224 \times 3$ pixels size were used for semantic segmentation. Roof-CNN model has a total of 10 layers and 104,450 updated parameters. Within the scope of comparative analysis, Roof-CNN model has less parameters compared to U-Net models. In addition, Roof-KSA model stands out with 0.91404 global accuracy, 0.73092 mean accuracy, 0.65537 mean intersection over union, 0.84918 weighted intersection over union and 0.67244 mean BF score. As a result, it is seen that Roof-CNN model is more successful in accordance with obtained semantic segmentation results.

Keywords- *Solar Energy, Deep Learning, Semantic Segmentation, Convolutional Neural Networks.*

I.GİRİŞ

İnsan ihtiyaçlarının giderilmesinde enerjinin rolü oldukça büyüktür. Özellikle tarım, sanayi, ulaşım, tekstil ve hatta gıda gibi birçok alanda elektrik enerjisine ihtiyaç vardır [1]. Enerjinin kesintisiz olarak devam etmesi, üretimden hastanedeki cihazların düzenli çalışarak insan sağlığına etkisine kadar birçok alan için elzemdir. Bu yüzden elektrik enerjisinin üretimi süreklilik arz etmelidir. Kömür gibi fosil yakıtlar elektrik enerjisi üretmek için uzun yıllardan beri kullanılmaktadır [2]. Fakat fosil yakıtlar kullanılarak enerji üretimi sera gazı emisyonlarına neden olarak küresel ısınma gibi küresel problemlerin oluşmasını tetiklemektedir. Bu durum bir ikilemi doğurmaktadır; insan yaşamı için gerekli olan enerjiyi fosil yakıtlar kullanarak üretmek insan yaşamının sürekliliğini tehdit eden küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bu problemin ortadan kaldırılması için güneş, rüzgâr, biokütle gibi temiz enerji kaynaklarının kullanılması önerilmiştir [3]. Bu kaynaklar dışarıdan hiçbir müdahaleye gerek duymadan sürekli olarak yenilendikleri için yenilenebilir enerji kaynakları ismini almışlardır. Bu kaynaklardan enerji üretimi sırasında doğaya verilen zarar minimum seviyede olduğu için bu kaynakların kullanımında son dönemlerde oldukça büyük bir artış vardır. Avrupa kıtasındaki açık deniz rüzgâr türbinleri kurulu gücü 2017 yılında 3.1GW'tır. 2016 yılının neredeyse iki katına eşit olan bu değer, ilerleyen yıllarda katlanarak artmaktadır [4]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması oldukça umut vericidir. Bunun yanı sıra araştırmacılar hangi yenilenebilir enerji kaynağının daha verimli olduğu konusunda bir takım çalışmalar yürütmüşlerdir. Sadece enerji üretmekle kalmayıp bunun yanında su ısıtma sistemi olarak kullanılması, birçok ülkede yemek pişirme sistemlerine dönüştürülmesi ve mekân ısıtıcısı olarak kullanılması sebebiyle güneş enerjisi oldukça öne çıkmaktadır. Bunlara ek olarak, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik gibi sistemlerden üretilen enerjinin uzak bölgelere ulaştırılması için harcanan ekonomik parametreler güneş enerjisinde gerekmemektedir [5]. Bu açıdan bakıldığında oldukça ekonomiktir. Bununla birlikte, her geçen yıl güneş paneli kurulum maliyetlerinin azaldığı gözlemlenmektedir.

Sürdürülebilir bir kalkınma ve sağlıklı bir dünya için fosil yakıtlardan elde edilen toplam enerji miktarının azaltılması oldukça önemlidir. Bu amaçla bireysel bazda alınabilecek en verimli önlem güneş panelleri kullanarak kendi enerjimizi bir ölçüde üretebilmektedir. Güneş enerjisini elektrik enerjine dönüştürmek için fotovoltaik (PV) paneller kullanılmaktadır [6]. Kelime anlamı olarak fotondan elektrik üretimi anlamına gelen fotovoltaik terimi aslında uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Fotovoltaik panellerin gelişim ve yayılım eğilimine baktığımızda teknolojinin gelişmesiyle çatılarımıza kadar gelmiştir. Özellikle dünyada üretilen enerjinin %20.1'inin evlerde tüketildiği düşünüldüğünde her evin çatısında elektrik üretiminin gerekliliği ortaya çıkmaktadır [7]. 2040 yılına geldiğimizde ise bu oranın %14 artacağı öngörülmektedir [8].

Günümüzde birçok evin çatısı incelendiğinde düz veya belirli bir eğimde olduğu ortaya çıkmaktadır. Düz veya az eğimli yüzeylerin güneş panelleri için uygun olduğu bilinmektedir. Bina çatılarının bu yapıları bol güneş alan bölgelerde oldukça kullanışlıdır. Bu binaların çatılarına güneş panellerinin kurulması hem elektrik enerjisi üretilmesini hem de sıcak su ihtiyacını karşılayacaktır. Burada en önemli konulardan bir tanesi çatıların güneşe maruz kalma süresinin hesaplanması ve verimin belirlenmesidir. Bazı durumlarda yüksek binalardan ve çeşitli faktörlerden dolayı her evin çatısına yeterli miktarda güneş gelmeyebilir. Bu durumlarda daha verimli yenilenebilir enerji yöntemlerinin seçilmesi gerekmektedir. Aksi halde PV sisteminin kurulum maliyetinin geri kazanılması çok uzun yıllar sürebilir [9]. Bu sebeple literatürde birçok araştırmacı güneşlenme süresi üzerine araştırmalar yapmıştır. Bu çalışmalar genellikle geniş bir bölgenin tamamı üzerine ortalama tahminlerden oluşmaktadır [10, 11]. Fakat böyle tahminler bazı küçük yerleşim birimleri için oldukça yanıltıcı olabilmektedir. Daha da önemlisi aynı bölge içerisinde bile bazı binalar hiç güneş almazken bazı binalar ise iyi güneş alabilirler. Bu sebeple oldukça dar bir alanda bu hesaplamaların yapılması ve hatta ideal olarak bina bazlı bu hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Fakat bina bazlı hesaplamalar manuel olarak gerçekleştirilirse bu oldukça uzun zaman ve işgücü gerektirir. Bu zorluğun önüne geçebilmek için literatürde bilgisayar tabanlı sistemlerden ve yapay zekâdan yararlanılmaktadır [12]. Hava araçlarından veya uydudan alınan görüntüler kullanarak ve bina çatılarının durumları incelenerek güneş alma süreleri ve çatının uygunluk durumu gibi birçok bilgi otomatik olarak elde edilebilir. Görüntü işleme tekniklerinin ve görüntüleme cihazlarının gelişmesini sayesinde bu işlemi saniyeler içerisinde yapmak olasıdır. Özellikle günümüzde Konvolüsyonel Sinir Ağları (KSA) gibi görüntü işleme problemleri için özel geliştirilen ağlar yardımıyla işlem başarısı da oldukça yüksek olmaktadır [13]. KSA, görüntü işleme problemleri için özel olarak geliştirilmiş iki boyutlu filtrelerin görüntü üzerinde kaydırılması ile çalışan otomatik bir görüntü işleme tekniğidir. Görüntü sınıflandırma, bölütleme, iyileştirme, kayıt ve erişim gibi bütün görüntü problemlerinde kullanılabilir [14]. Giriş görüntüleri ve çıkış hedefleri ile yeterli seviyede eğitilen bir KSA

mimarisi bir uzman gibi kararlar verebilmektedir. Bu sebeple bina çatılarında otomatik olarak güneş paneli verimi tespitinde kullanılabilir en uygun teknik olarak düşünülmüştür.

Bu çalışmada bina çatılarının güneş enerjisi potansiyeli KSA mimarisi kullanılarak hesaplanmaktadır. Havadan çekilmiş uydu görüntüleri kullanılarak her binanın potansiyeli otomatik olarak değerlendirilmekte ve güneş paneli kurulumu yapılabileceği kararı verilmektedir. Bu amaçla ilk olarak uydudan alınmış görüntülerde, binalar ve diğer alanlar tespit edilmektedir. Bu işlem önerilen Roof-KSA mimarisi tarafından otomatik olarak orta katmanlarda gerçekleştirilmektedir. Roof-KSA giriş katmanlarında kenar ve renk gibi daha düşük seviye bilgileri öğrenirken, orta katmanlarda ise binalar ve diğer görüntü nesnelerinin birbirinden ayrılmasını öğrenir. Önerilen mimarinin ileriki katmanlarında ise daha zorlayıcı bir görev olan hangi piksellerin çatı ile alakalı olduğu hangi piksellerinde binanın diğer bölümleriyle ilgili olduğu bilgiler otomatik olarak tespit edilmektedir. Önerilen yöntemin diğer yöntemlere göre en büyük avantajı ve literatüre katkısı çatı bulmak için özel olarak geliştirilmesi sayesinde küçük çatıları yüksek duyarlılıkla yakalayabilmesidir. Buna ek olarak, konvolüsyon kernelleri ile işlem yapıldığından her bir binanın tespiti için özel olarak işlem yaparken aslında eş zamanlı olarak tüm görüntüyü de tarar.

Çalışmanın geri kalanı şu şekildedir; kullanılan veri kümesi ve yöntemin detayları Bölüm 2’de anlatılmaktadır. Bölüm 3’te elde edilen bulgular ve tartışma sunulmaktadır. Bölüm 4’te sonuçlar yer almaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Veri Kümesi

Önerilen yöntemin test edilmesi amacıyla Massachusetts Building Dataset [15] ismi verilen veri kümesi kullanılmaktadır. Veri kümesi iki adet görüntü tipi içermektedir. İlk görüntüler orijinal görüntüler olarak adlandırılan üç kanallı uydu görüntüleridir. İkinci sınıftaki görüntüler ise tek kanaldan oluşmaktadır ve orijinal görüntülerin hedef görüntüleridir. Yani Şekil 1’de görüldüğü gibi çatıların açıkça işaretlendiği görüntülerdir. Toplamda 150 adet görüntüden oluşan bu veri kümesindeki her görüntünün çözünürlüğü 1500×1500 pikseldir. Veri kümesi kendi içerisinde eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Deneylerimiz sırasında bu görüntülerden 224×224 piksel boyutlarına sahip bölümler alınmıştır. Bu bölümler toplamda 3400 adet görüntüden oluşmaktadır. Görüntülerin 2400 adeti eğitim, 200 adeti doğrulama ve 800 adeti de test verisi için ayrılmıştır. Bu işlemin uygulanmasının temel nedeni donanımsal kapasitesinin kısıtlı olmasıdır. Şekil 1’de oluşturulan veri seti kümesinden orijinal görüntü ve hedef görüntüler bulunmaktadır.

B. Derin Öğrenme ve Konvolüsyonel Sinir Ağları

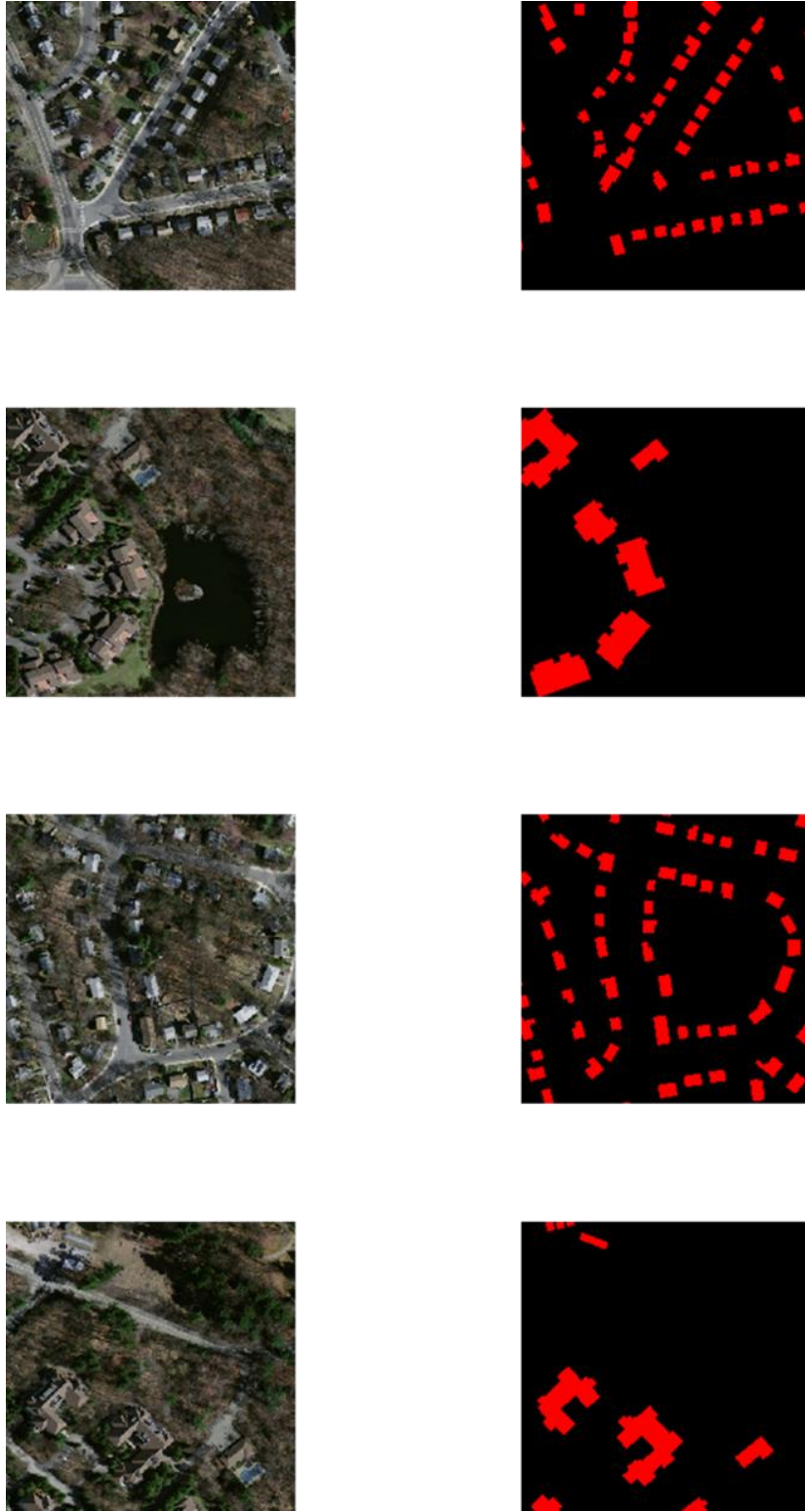
Yapay zeka insan beynini öğrenme sisteminden yararlanarak geliştirilmiş bir makine öğrenmesi tekniğidir. İnsan beyni sinir sistemi içerisinde gerçekleşen öğrenme faaliyetlerine benzer olarak nöron modelleri geliştirilerek çeşitli mantıksal işlemlerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır [16]. İlk zamanlarda sadece basit ve tekrarlayan işlemlerin yapılması için düşünülen yapay zekâ algoritmaları günümüzde oldukça karmaşık görevleri yerine getirebilmektedir. Hatta insan sağlığı için tehlikeli görevlerin yerine getirilmesi veya insan kabiliyetlerinin yetersiz kaldığı durumlarda yapay zekâdan faydalanılmaktadır [17]. Yapay sinir ağları ile başlayan bu macera günümüzde teknolojinin oldukça gelişmesi ile tam otomatik sistemlere kadar ilerlemiştir. Dahası yapay zekânın insan ırkına üstünlük kurabileceğine dair tartışmalar bile başlamıştır [18]. Günümüz yapay zeka teknikleri birçok görevi defalarca tekrarlayarak öğrenmekte ve benzer görevleri kusursuzca yerine getirebilmektedir. Bu çalışmada ise görüntü işleme üzerine son yılların en önemli yapay zeka mimarisi kabul edilen KSA üzerinde durulacaktır. Aslında fikirselleşen temelleri 1989 yılına dayanan bu mimari 2011’de bir görüntü işleme yarışmasının kazanılmasından sonra ünlü hale gelmiştir [19]. Bunca yıl beklemesinin diğer sebebi ise donanımsal eksikliklerdir.

KSA mimarisi; konvolüsyon, havuzlama, lineer birim (ReLU), gizli katmanlar, sınıflama katmanı, kaçınma katmanı gibi birçok katmanın bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Saydıklarımız neredeyse tüm KSA mimarilerinde bulunan temel katmanlar olarak görülse de bazı katmanlar kullanılmayabilir veya bazı farklı katmanlar eklenebilir. Çünkü günümüzde KSA mimarileri ile oldukça yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir ve neredeyse her gün yeni bir mimari veya yeni bir katman önerilmektedir [20]. KSA mimarisinin görüntü işleme problemlerindeki başarısının anlaşılması için katmanlarının incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla temel katmanlar sırayla açıklanacaktır. Fakat öncelikle KSA mimarisi sadece bir konvolüsyon, bir havuzlama ve ReLU

katmanından oluşması durumunda çıkışında elde edilecek değeri anlatımın basit olması için açıklanacaktır. Eşitlik 1 tek katmanlı bir KSA çıkışını hesaplamak için kullanılmaktadır.

$$f(I) = \text{pool}_{n \times n}(\sigma(w \times I + b)) \quad (1)$$

Eşitlik 1'de I giriş görüntüsünü, pool havuzlama işlemini, n havuzlama matrisinin boyutunu, σ aktivasyon fonksiyonunu, w konvolüsyon katmanındaki ağırlıkları, x konvolüsyon işlemini ve b konvolüsyon katmanı bias değerini temsil etmektedir. Konvolüsyon katmanı kernel ismi verilen özellik matrislerinden oluşmaktadır. Bu özellik matrisleri görüntüden daha küçük boyutlardadır ve görüntü üzerinde kaydırılmaktadır. Ağın öğrendiği özellikler bu matrisler içerisinde saklanmaktadır. Bir konvolüsyon katmanında birden fazla özellik matrisi bulunmaktadır ve konvolüsyon matrislerindeki tüm değerler eğitilebilir. Eğitim sırasında bu değerler güncellenerek ağın özellikleri öğrenmesi sağlanmaktadır. Bu katmandaki özellik matrislerinin görüntü üzerinde kaydırılması sayesinde parametre sayısı oldukça azalmaktadır. Buna literatürde özelliklerin paylaşımı ismi verilmektedir.



Şekil 1. Orijinal görüntü (solda), hedef görüntü (sağda)

Havuzlama katmanının görevi ise en basit tanımıyla matristeki önemli özellikleri koruyarak matris boyutunu düşürmektedir. Böylece eğitilmesi gereken parametre sayısı azaltılarak donanımsal yeterlilik desteklenmektedir. Buna ek olarak eğitim süresinin kısaltması ve ezberleme eğiliminin azalması gibi katkıları da göz ardı edilemez. Problemin durumuna göre havuzlama yöntemi seçilebilir. Literatürde en sık karşılaşılan havuzlama teknikleri; maksimum havuzlama, ortalama havuzlama ve toplam havuzlamadır. Bu yöntemlerde öncelikle bir pencere boyutu belirlenmektedir ve bu pencere kare olmalıdır. Görüntü üzerinde kaydırılan bu pencerenin altında kalan pikseller ile ilgili işlemler yapılır. Maksimum havuzlama için pencere altında kalan piksellerden en büyük değerli piksel seçilerek işlemlere sadece o pikselle devam edilir. Ortalama havuzlama için pencere altındaki piksellerin ortalaması alınır, toplam havuzlamada ise pencere altında kalan piksellerin toplam değeri ile işlemlere devam edilir. Bu işlemin en önemli avantajı bilgi kaybı olmadan matris boyutunun önemli ölçüde küçültülmesidir.

Düzeltilmiş Doğrusal Birim (ReLU) katmanı ağıın doğrusallığını bozmak için kullanılan bir aktivasyon fonksiyonudur. Bu katman sayesinde özellikle derin ağların en büyük problemlerinden biri olan ağıdaki eğitim örneklerine aşırı uyum probleminin önüne geçilebilmektedir. Buna ek olarak gradyan değerinin yok olmasını önleyerek güncelleme işleminin sıfır değerine dönüşmesini önleyebildiği durumlarda mevcuttur.

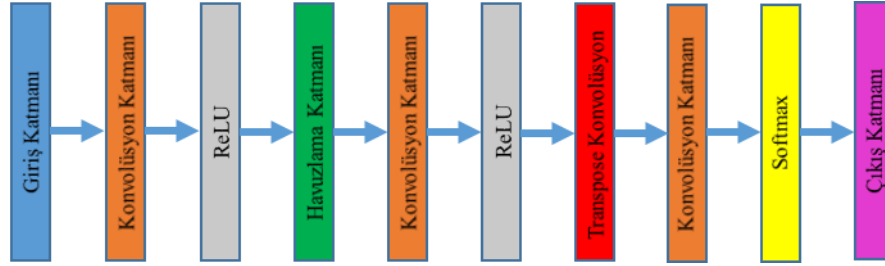
Tam bağı katmanı (FCL) matris halinde devam eden KSA mimarisinin artık vektör haline gelmesini sağlamaktadır. Bu kısımda matris haline dönüştürülen özellikler geleneksel yapay sinir modeli ile sınıflandırılmaktadır. İstenilen sınıf sayısı ve gizli katman özelliklerine göre ağıın bu kısmı aynı diğer kısımları gibi değiştirilebilir. Sınıflama işlemlerinde kullanılan ve sınıflama katmanı olarak ta adlandırılabilen softmax katmanı çoklu sınıflarda olasılık dağılımına göre sınıf oranları belirlemektedir. Genellikle ağıın son katmanı olarak kullanılır.

Temel katmanlar arasında olmamalarına rağmen neredeyse her mimaride karşımıza çıkan bir diğer katman ise kaçınma (dropout) katmanıdır. Ne kadar önlem alınırsa alınsın derin ağlar her zaman eğitim verilerini ezberleme eğilimindedir. Ağıın bir önceki katmanlarında bu işlemin önlenmesine destek olan katmanlardan bahsettik. Fakat son durumda ağı parametreleri öğrenme işlemini işbirlikçi olarak yapmaktadır. Yani birbirinin oranlarına göre güncelleme yapmaktadır. Bu durumda eğitim işlemi istenen başarıya ulaşamaz. Bu durumu kırmak için kaçınma katmanı kullanılır. Kaçınma katmanı eğitim aşamasında belirlenen değere göre ağıın belli bir yüzdesinin kullanılmasını sağlayarak nöronlar arası güncellemeyi kontrol eder. Son olarak birleştirme katmanı ise iki farklı matrisi arka arkaya ekleyerek birleştirir [21].

C. Önerilen KSA Mimarisi

Derin mimariler oldukça kapsamlı olması sayesinde öğrenme işlemi oldukça kuvvetli ve gürbüz biçimde yerine getirirler. Fakat çok fazla eğitilebilir parametre olması eğitim için gerekli olan örnek ihtiyacını artırır. Buna ek olarak ağıın ezberlemeye olan kırılganlığını artırır. Önerilen yöntemde az parametre kullanılarak yüksek bir bölütleme performansı elde etmek amaçlanmıştır. Tasarlanan KSA ağı toplamda 10 katmandan oluşmaktadır. KSA ağıın ilk katmanı görüntü giriş katmanı olup $224 \times 224 \times 3$ piksel boyutundadır. Buradadik 224×224 giriş görüntüsünün boyutlarını belirtmektedir. 3 rakamı ise giriş görüntüsü renkli olduğunda kullanılır. Sonrasında sırasıyla birer adet konvolüsyon ve ReLU katmanı bulunmaktadır. Konvolüsyon katmanı 64 adet 3×3 görüntü filtrelerinden oluşmaktadır. Konvolüsyon katmanında kayma adımı 1 olup 1 piksel genişliğinde dolgu işlemi uygulanmıştır. Ardından maksimum havuzlama, konvolüsyon ve ReLU katmanları gelmektedir. Maksimum havuzlama katmanında 2×2 havuzlama pencereleri bulunmaktadır. Havuzlama katmanında dolgu işlemi uygulanmamış olup kayma adımı 2 olarak belirlenmiştir. Sonrasında gelen konvolüsyon katmanında 64 adet 3×3 görüntü filtreleri mevcut olup kayma adımı 1 olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu katmanda herhangi bir dolgu işlemi uygulanmamıştır. Her konvolüsyon katmanından soran ise ReLU aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiştir. ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılarak Roof-KSA mimarisindeki doğrusallık giderilmeye çalışılmıştır. Son dört katman sırasıyla transpose konvolüsyon katmanı, konvolüsyon katmanı, softmax ve çıkış katmanıdır. Transpose konvolüsyon katmanı öğrenilebilir parametrelere sahip olup hedef görüntünün elde edilmesi için önemli bir katmandır. Transpose konvolüsyon katmanı normal konvolüsyon katmanının tam tersi olarak işlem yapmaktadır. Bu katman görüntü boyutlarını tekrardan büyütmeğe başlar. Roof-KSA yapısında transpose konvolüsyon katmanı içerisinde 64 adet 4×4 görüntü filtreleri bulunur. Kayma adımı ise 2 birimdir. Sonrasında bulunan konvolüsyon katmanında 2 adet 1×1 filtre boyutuna sahip konvolüsyon filtresi bulunur. Kayma adımı 1 olarak belirlenmiştir.

Son iki katman ise piksel sınıflaması için softmax ve çıkış katmanı bulunmaktadır. Şekil 2’de Roof-KSA mimarisinin yapısı bulunmaktadır. Aynı zamanda Tablo 1’de katmanlara ait parametre sayıları bulunmaktadır.



Şekil 2. Önerilen Roof-KSA Yapısı

Bu çalışmadaki Roof-KSA mimarisinin eğitimi sırasında eğitim oranı 0.0001 olarak kullanılmaktadır. Eğitim işleminde görüntüler küçük gruplara ayrılmaktadır. Bu küçük gruplar 16 adet görüntülerden oluşmaktadır. Parametrelerin güncellenmesi için ise stokastik gradyan azalma algoritması kullanılmaktadır.

Tablo 1. Önerilen Roof-KSA Yapısının Parametre Değerlendirilmesi

Katmanlar	Öğrenilen Parametreler	Parametre Sayısı
Giriş Katmanı	-	-
Konvolüsyon Katmanı	3×3×3×64	1792
ReLU	1×1×64	-
Maksimum Havuzlama	-	-
Konvolüsyon Katmanı	-	36928
ReLU	3×3×64×64	-
Transpose Konvolüsyon	1×1×64	65600
Konvolüsyon Katmanı	-	130
Softmax	4×4×64×64	-
Çıkış Katmanı	1×1×64	-

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında uydu görüntüleri içerisindeki çatıların bölütlenmesi sağlanarak ilgilenilen bölgenin güneş enerjisi üretim kapasitesinin anlaşılması amaçlanmıştır. Toplamda 3400 adet 224×224×3 piksel boyutlarında uydu görüntüsü kullanılmıştır. Bu görüntülerin hepsi renkli görüntülerdir. Verilerin 2400 adeti eğitim, 200 adeti doğrulama ve 800 adeti test işlemi için ayrılmıştır. Bulguların elde edilmesi sürecinde 3.3 GHz’lik Intel Core i7 işlemci gücüne sahip bilgisayar ve NVIDIA GTX 1050 TI ekran kartından yararlanılmıştır. Eğitim aşamasında Roof-KSA mimarisi için bazı eğitim ayarları gerçekleştirilmiştir. Toplam epok sayısı 25 olarak belirlenmiş ve öğrenme oranı 10^{-4} olarak seçilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak Stokastik Gradyan Azalış algoritması kullanılmıştır. Analizlerin tamamı Matlab 2019b programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca karşılaştırmalı analiz kapsamında 3 ve 5 derinlikli U-Net mimarilerinin metrik sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen metrik sonuçları Tablo 2’de yer almaktadır.

Tablo 2. Karşılaştırmalı Analiz Sonuçları

Yöntemler	Küresel Doğruluk	Ortalama Doğruluk	Ortalama EBO	Ağırlıklandırılmış EBO	Ortalama BF Skoru
U-Net-3	0.90253	0.64095	0.582	0.82445	0.62139
U-Net-5	0.89724	0.74981	0.63964	0.83116	0.62417
Roof-KSA	0.91404	0.73092	0.65537	0.84918	0.67244

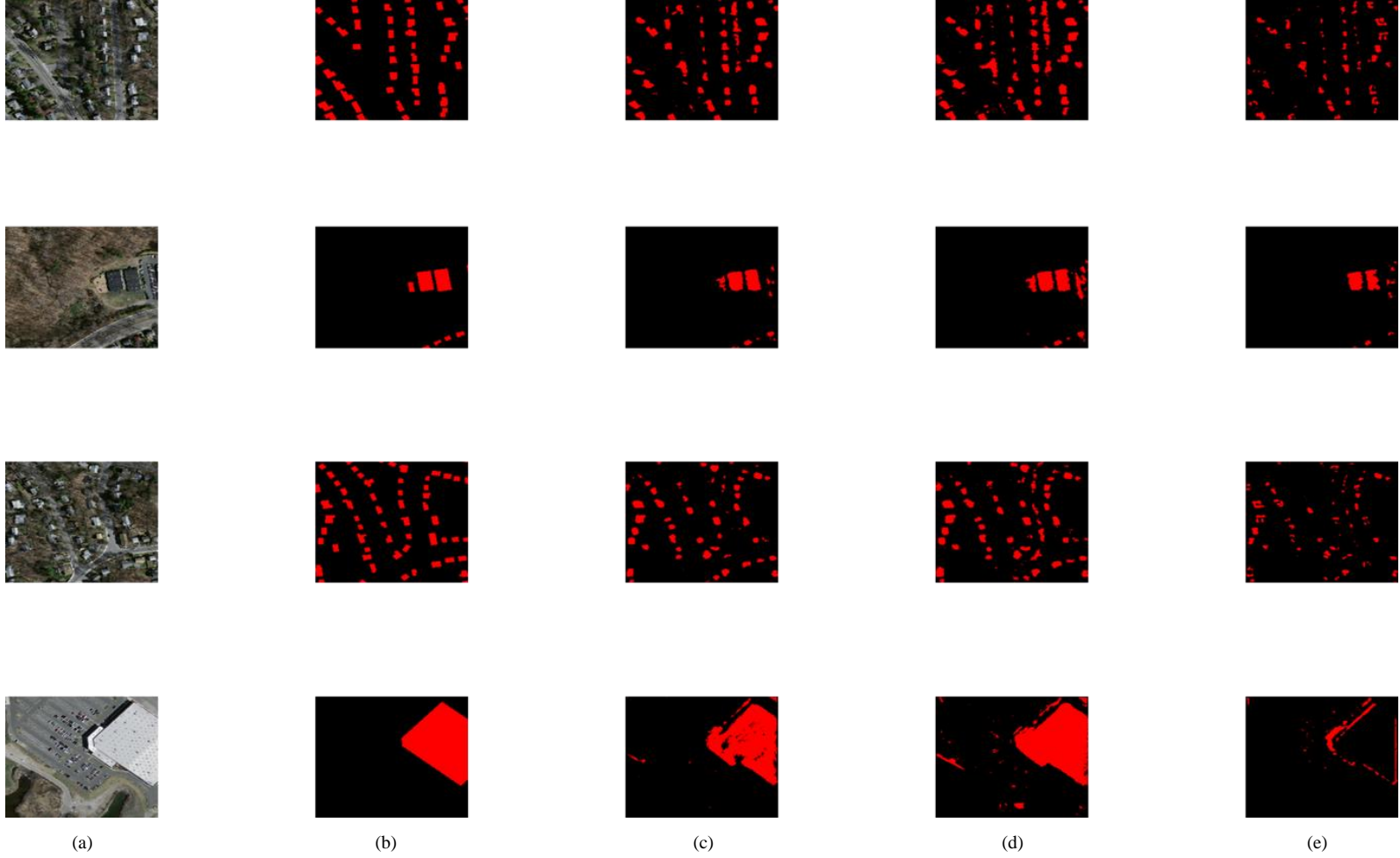
Tablo 2 incelendiğinde önerilen yöntemin metrik performansı 3 ve 5 derinlikli U-Net yapılarının performansından daha yüksek olduğu görülmektedir. Küresel doğruluk metriğinde Roof-KSA yapısı 0.91404 değerine sahiptir. En düşük performansı 0.89724 değeri ile U-Net-5 modeli sahiptir. Ortalama doğruluk değerleri dikkate alındığında U-Net-5 modeli 0.74981 metrik değerine sahiptir. Ortalama Eşleşmiş Bölge Oranı (Ortalama EBO) metriğinde Roof-KSA yapısı 0.65537 değeri ile en yüksek performansı elde etmiştir. En yüksek Ağırlıklandırılmış EBO ve ortalama BF skoru metrik değerleri 0.84918 ve 0.67244 ile Roof-KSA yapısına aittir. Tablo 3’de U-Net yapıları ve Roof-KSA yapısının toplam katman sayısı ve toplam güncellenen parametre sayıları verilmiştir.

Tablo 3. Modelleri Karşılaştırmalı Toplam Katman ve Parametre Sayıları

Yöntemler	Toplam Katman Sayısı	Öğrenilen Parametreler
U-Net-3	46	7,697,410
U-Net-5	70	124,362,242
Roof-KSA	10	104,450

Toplam parametre sayıları dikkate alındığında önerilen Roof-KSA 104,450 adet güncellenen parametre sayısı ile eğitimi ve test süreleri en düşük modeldir. U-Net-5 ve U-Net-3 modelleri 7,697,410 ve 124,362,242 adet toplam güncellenen parametre sayısı ile oldukça ağır modellerdir. Toplam katman sayısı incelendiğinde 10 adet katman sayısı ile en az katmana sahip model Roof-KSA’dır. U-Net-5 modeli 70 adet katman ile en fazla katmana sahip KSA modelidir. Şekil 3’de karşılaştırmalı olarak elde edilen bölütlenmiş görüntüler yer almaktadır.

Önerilen yöntemin sonuçları literatürde sıklıkla kullanılan ve oldukça güçlü olan mimarilerden daha dikkat çekicidir. Bunun yanında önerilen yöntemin hızı U-Net-3 ve U-Net-5 mimarilerinden oldukça hızlıdır. Test aşamasında diğer mimarilere nazaran neredeyse 10 kat daha çabuk bir biçimde sonuç üretmektedir. Bu hızın sebebi Roof-KSA parametre sayısının diğer mimarilere göre oldukça az olmasıdır. Yüksek performans göstermesindeki en önemli etken ise veri kümesine göre yapılmış olan tasarımıdır. Bu çalışmada kullanılan verilerin sayısı büyük mimarilerin eğitimi için yeterli gelmemektedir. Bu sebeple önerilen Roof-KSA mimarisi hem performansı hem de hızı bakımından en verimli yöntemdir.



Şekil 3. a) Giriş Görüntüsü b) Maske Görüntüsü c) Roof-KSA İle Elde Edilen Sonuç d) U-Net-5 İle Elde Edilen Sonuç e) U-Net-3 İle Elde Edilen Sonuç

Şekil 3’de verilen bölütleme sonuçları verilmiştir. Önerilen Roof-KSA ile elde edilen bölütleme sonuçları diğer yöntemlere nazaran oldukça başarılıdır. Görüntülerde tekli veya çoklu yerleşim yerlerinin bulunması Roof-KSA yapısının bölütleme performansında herhangi bir etkisi olmadığı görülmektedir. U-Net-3 modelinde elde edilen performans düşüklüğü hem Şekil 3-e hem de Tablo 2’de verilen metrik performansında net bir şekilde görülmektedir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma uydudan alınmış görüntülerde çatıları bölütleyerek evlerin güneş enerjisi için uygunluğunu otomatik olarak ölçebilen bir yöntem sunmaktadır. Önerilen yöntem çatıların hızlı bir biçimde ve doğru olarak tespit edilebilen bir KSA mimarisidir. Hızın korunması için daha az eğitilebilir parametreye sahip olan bu mimari Massachusetts Building Dataset veri seti kullanılarak eğitilmiştir. Önerilen yöntemin başarısının karşılaştırılması için literatürdeki en başarılı segmentasyon yöntemlerinden olan u-net mimarisi kullanılmıştır. Birbirine eş olarak yapılan deneyler önerilen yöntemin diğer yöntemlerden daha yüksek başarıya sahip olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak önerilen yöntem diğer yöntemlerden neredeyse 10 kat daha hızlı biçimde sonuç üretmektedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki verilere göre oluşturulan mimari verimliliği gelecekte algoritma oluşturmayı büyük ölçüde etkileyecektir. Son olarak gelecekte yapılması planlanan çalışmalar için çatılar üzerinde güneş panelinin tespiti ve çatıların boyutlarının tespiti gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Harrouz, A., Colak, I., Kayisli, K. (2019). Energy Modeling Output of Wind System based on Wind Speed. In 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) (pp. 63-68). IEEE.
- [2] Rehman, A., Rauf, A., Ahmad, M., Chandio, A. A., Deyuan, Z. (2019). The effect of carbon dioxide emission and the consumption of electrical energy, fossil fuel energy, and renewable energy, on economic performance: evidence from Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(21), 21760-21773.
- [3] Johlas, H., Witherby, S., Doyle, J. R. (2020). Storage requirements for high grid penetration of wind and solar power for the MISO region of North America: A case study. *Renewable Energy*, 146, 1315-1324.
- [4] Robles, E., Haro-Larode, M., Santos-Mugica, M., Etxegarai, A., Tedeschi, E. (2019). Comparative analysis of European grid codes relevant to offshore renewable energy installations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 171-185.
- [5] Akcan, E., Kuncan, M., Minaz, M. R. (2020). PVsyst Yazılımı İle 30 Kw Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 248-261.
- [6] Cui, Y., Yao, H., Zhang, J., Zhang, T., Wang, Y., Hong, L., Wei, Z. (2019). Over 16% efficiency organic photovoltaic cells enabled by a chlorinated acceptor with increased open-circuit voltages. *Nature communications*, 10(1), 1-8.
- [7] Khasraw Bani, R., Jalal, S. J. (2019). Impact of shadow distribution on optimizing insolation exposure of roofs according to harness or transfer of solar energy in Sulaimani city, Iraq. *Renewable energy*, 136, 452-462.
- [8] Eia, U. S. (2017). *The international energy outlook 2016*.
- [9] Wu, G., Yang, Q., Fang, H., Zhang, Y., Zheng, H., Zhu, Z., Feng, C. (2019). Photothermal/day lighting performance analysis of a multifunctional solid compound parabolic concentrator for an active solar greenhouse roof. *Solar Energy*, 180, 92-103.
- [10] Victoria, M., Andresen, G. B. (2019). Using validated reanalysis data to investigate the impact of the PV system configurations at high penetration levels in European countries. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 576-592.

- [11] Ghimire, S., Deo, R. C., Downs, N. J., Raj, N. (2019). Global solar radiation prediction by ANN integrated with European Centre for medium range weather forecast fields in solar rich cities of Queensland Australia. *Journal of cleaner production*, 216, 288-310.
- [12] Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B. (2011). Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network. *Solar energy*, 85(11), 2856-2870.
- [13] Shen, S., Yang, H., Yao, X., Li, J., Xu, G., Sheng, M. (2020). Ship Type Classification by Convolutional Neural Networks with Auditory-Like Mechanisms. *Sensors*, 20(1), 253.
- [14] Zhou, D. X. (2020). Universality of deep convolutional neural networks. *Applied and computational harmonic analysis*, 48(2), 787-794.
- [15] Mnih, V. (2013). *Machine learning for aerial image labeling*. University of Toronto (Canada).
- [16] Hassabis, D., Kumaran, D., Summerfield, C., Botvinick, M. (2017). Neuroscience-inspired artificial intelligence. *Neuron*, 95(2), 245-258.
- [17] Nagy, G., Anderson, J. (2016, May). Active recruitment mechanisms for heterogeneous robot teams in dangerous environments. In *Canadian Conference on Artificial Intelligence* (pp. 276-281).
- [18] Marr, B. (2018). Is Artificial Intelligence dangerous? 6 AI risks everyone should know about. *Forbes*.
- [19] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 1097-1105).
- [20] Wei, Y., Xiao, H., Shi, H., Jie, Z., Feng, J., Huang, T. S. (2018). Revisiting dilated convolution: A simple approach for weakly-and semi-supervised semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 7268-7277).
- [21] Hu, W., Huang, Y., Wei, L., Zhang, F., Li, H. (2015). Deep convolutional neural networks for hyperspectral image classification. *Journal of Sensors*, 2015.

Araştırma Makalesi - Research Article

Kanser Teşhisi için Makine Öğrenmesi Tekniklerine Dayalı Yeni Bir Sınıflandırma Metodu

Can Eyüpoğlu^{1*}, Erdem Yavuz²

Geliş / Received: 25/05/2020

Revize / Revised: 24/06/2020

Kabul / Accepted: 29/06/2020

ÖZ

İnsan ölümlerinin en büyük nedenlerinden biri kanserdir. Kadınlar arasındaki kanser ölümlerinin başlıca sebebi ise meme kanseridir. Bu kanser türü sebebiyle yaşanan ölümleri azaltmanın yolu erken teşhistir. Uzman sistemler, yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin tıp alanında kullanılmasının temel amaçlarından biri hastalıkları erken teşhis etmede doktorlara yardımcı olmaktır. Kanser türleri arasında özellikle meme kanserinde erken teşhis sayesinde ölüm riski büyük oranda düşürülebilir. Bu çalışmada temel bileşen analizi (Principal Component Analysis-PCA) ve ileri beslemeli sinir ağı (Feed Forward Neural Network-FFNN) temelli yeni bir kanser teşhisi yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin performansı Meme Kanseri Coimbra Veri Seti (Breast Cancer Coimbra Dataset-BCCD) üzerinde sınıflandırma doğruluğu, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü metrikleri ile test edilmiştir. Ayrıca önerilen yöntemin klasik makine öğrenmesi teknikleri ve literatürdeki çalışmalar ile ayrıntılı olarak karşılaştırmalı performans analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen yöntemin etkin olduğunu ve erken teşhis için doktorlar tarafından kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler - Kanser Teşhisi, Meme Kanseri, Makine Öğrenmesi, Temel Bileşen Analizi, İleri Beslemeli Sinir Ağı

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ceyupoglu@hho.edu.tr, caneyupoglu@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6133-8617>)
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Hava Harp Okulu, Milli Savunma Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

²İletişim: erdem.yavuz@btu.edu.tr, erdemyavuz29@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3159-2497>)

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

A New Classification Method Based on Machine Learning Techniques for Cancer Diagnosis

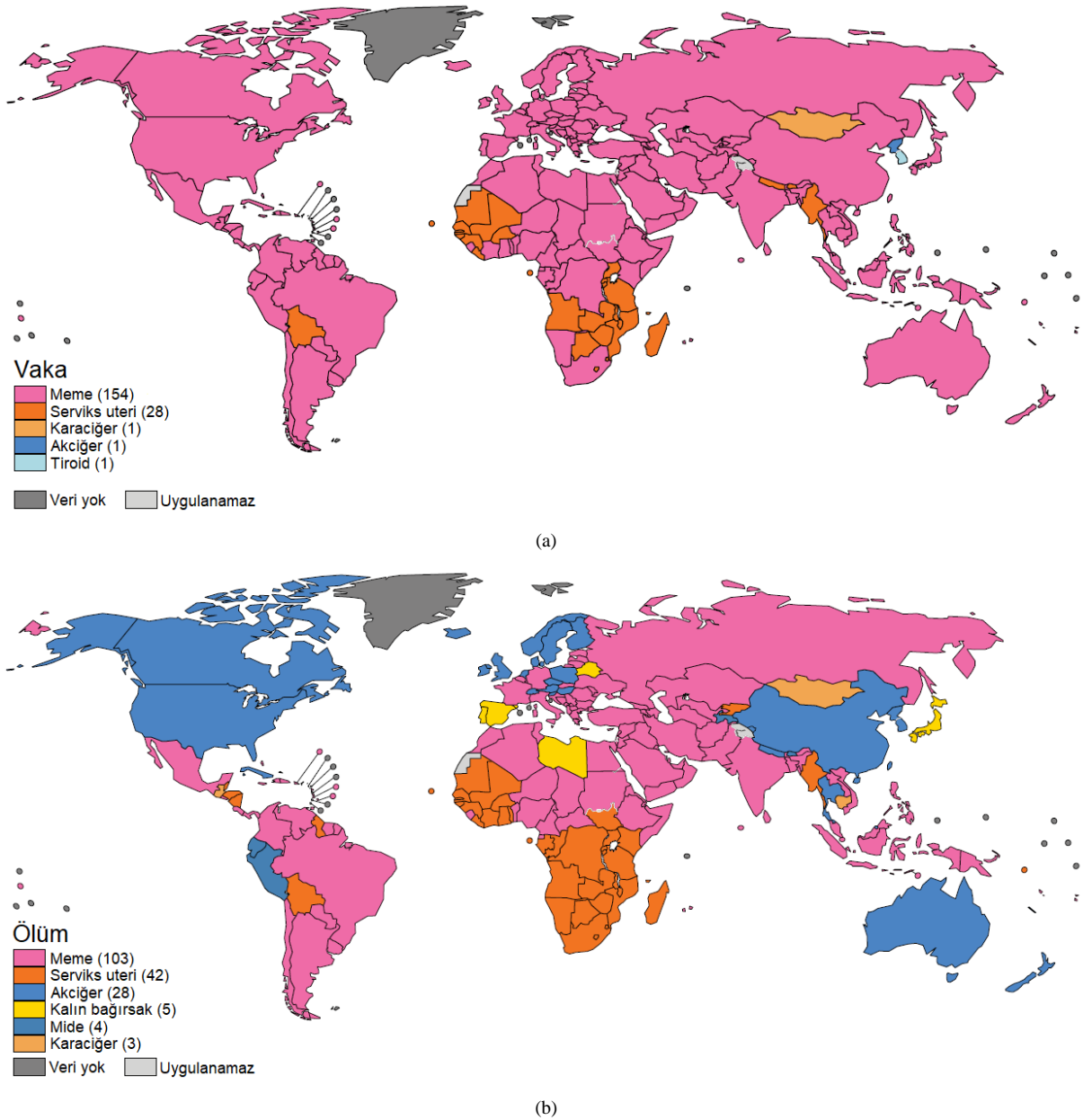
ABSTRACT

One of the major causes of human death is cancer. Breast cancer is the main reason for cancer deaths among women. Early diagnosis is the way to reduce deaths due to this cancer type. One of the main objectives of the use of expert systems, artificial intelligence and machine learning techniques in medicine is to assist doctors in early diagnosis of diseases. Among cancer types, the risk of death can be greatly reduced by early diagnosis, especially in breast cancer. In this study, a new cancer diagnosis method based on Principal Component Analysis (PCA) and Feed Forward Neural Network (FFNN) has been proposed. The performance of the proposed method is tested on the Breast Cancer Coimbra Dataset (BCCD) with classification accuracy, precision, recall and F-measure metrics. Besides, the comparative performance analysis of the proposed method with conventional machine learning techniques and studies in the literature is performed. Experimental results show that the proposed method is effective and can be utilized by doctors for early diagnosis.

Keywords - Cancer Diagnosis, Breast Cancer, Machine Learning, Principal Component Analysis, Feed Forward Neural Network

I. GİRİŞ

Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (International Agency for Research on Cancer-IARC) [1] 2018 yılında dünya çapında yaklaşık 18,1 milyon kişiye kanser hastalığı tanısı konduğunu ve yaklaşık 9,6 milyon kişinin öldüğünü bildirmiştir. Dünya genelinde en sık görülen kanser türü akciğer kanseridir. Tüm vakaların %11,6'sında görülmektedir ve tüm ölümlerin %18,4'ünün sebebidir. En sık görülen ikinci kanser türü ise tüm ölümlerin %11,6'sına neden olan meme kanseridir. Ayrıca kadınlarda görülen kanser ölümlerinin başlıca nedenidir. 2018 yılında yaklaşık 2,1 milyon kadına meme kanseri teşhisi konmuştur. Şekil 1'de 2018 yılında kadınlar arasında dünya çapındaki kanser vaka ve ölüm oranı gösterilmektedir. Görüldüğü üzere meme kanseri 185 ülkenin 154'ünde en sık tanı konulan kanser türüdür. 103 ülkede ise kanser ölümlerinin başlıca sebebidir [2-4].



Şekil 1. 2018 yılında kadınlar arasında dünya çapındaki kanser vaka ve ölüm oranı: (a) Vaka ve (b) Ölüm oranı [2-4]

Meme kanseri hastalığı nedeniyle olan ölümlerin sayısını düşürmenin yolu erken teşhistir. Hastalık teşhisi tıp alanında çok karmaşık bir süreçtir ve doğru tanı için çeşitli testler gereklidir. Bilgisayar bilimindeki son gelişmeler sayesinde geliştirilen yapay zeka teknikleri, uzman sistemler ve makine öğrenmesi yöntemleri, hastalıkları erken teşhis etmede doktorlara yardımcı olmak için kullanılmaktadır. Özellikle meme kanseri hastalığında erken teşhis sayesinde hastalara daha fazla tedavi seçenekleri uygulanabilir ve ölüm riski en aza indirilebilir [5,6]. Erken tanının hayati önem taşıdığı meme kanseri hastalığı için rutin kan analizi gibi düşük maliyetli ve kullanımı kolay yöntemlerden yararlanmak, mamografi ve manyetik rezonans görüntüleme (Magnetic Resonance Imaging-MRI) önce oldukça pratiktir.

2018 yılında rutin kan analizine dayanan ve Meme Kanseri Coimbra Veri Seti (Breast Cancer Coimbra Dataset-BCCD) adı verilen yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti rutin kan analizi testleri ile deneklerden toplanan verilerden oluşturulduğu için meme kanseri, makine öğrenmesi yöntemleriyle daha kolay ve düşük maliyetle teşhis edilebilir. BCCD ilk olarak Patricio vd. [7] tarafından yapılan çalışmada 116 gönüllünün 9 klinik özelliği toplanarak oluşturulmuştur. Meme kanseri tanısı için Monte Carlo çapraz geçirme (Monte Carlo Cross Validation-MCCV) ile birlikte destek vektör makinesi (Support Vector Machine-SVM), lojistik regresyon (Logistic Regression) ve rastgele ormanlar (Random Forests) teknikleri kullanılmıştır. En iyi AUC (Area Under the Curve) değerleri SVM tekniği ile 0,87-0,91 aralığında elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, rutin kan analizi yoluyla toplanan klinik özelliklerin, meme kanseri hastalığının varlığını tespit etmek için kullanılmasında umut verici olduğunu göstermektedir. Aynı veri setini kullanan diğer bir çalışmada Li ve Chen [8], meme kanseri hastalığı tahmini için SVM, karar ağacı (Decision Tree), rastgele ormanlar, yapay sinir ağı (Artificial Neural Network-ANN) ve lojistik regresyon yöntemlerinin performansını incelemiş ve karşılaştırmıştır. Çalışmanın deneysel sonuçları, rastgele ormanlar sınıflandırıcısının performansının 0,785 AUC değeri ve %74,3 doğruluk oranı ile diğer sınıflandırma yöntemlerinden daha iyi olduğunu göstermektedir. Livieris vd. [9] Co-training, Self-training ve Tri-training (CST)-oylama'nın ileri bir modeli olan ve geliştirilmiş CST-oylama (Improved CST-Voting) olarak adlandırılan bir meme kanseri hastalığı tahmin algoritması önermiştir. Bu algoritmanın genel sınıflandırma doğruluğu %77,59'dur. Aslan vd. [10] ise aynı veri setini kullanarak yapmış oldukları çalışmada meme kanseri hastalığını teşhis etmek için ANN, SVM, k-en yakın komşu (k-Nearest Neighbours-k-NN) ve aşırı öğrenme makineleri (Extreme Learning Machine-ELM) tekniklerinin sınıflandırma performansını incelemişlerdir. Karşılaştırmalı deney sonuçları, ELM'nin %80'lik sınıflandırma doğruluğu ile en iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir. Bu makalede ise daha önce yapılan çalışmalardan farklı PCA ve FFNN tekniklerini kullanan yeni bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca klasik makine öğrenmesi tekniklerinin BCCD veri seti üzerindeki sınıflandırma doğruluğu, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü performansı ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın diğer bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de çalışmada kanser teşhisi için kullanılan veri seti, PCA ile FFNN teknikleri ve bu iki tekniği temel alarak önerilen yöntem açıklanmaktadır. Bölüm 3'te önerilen yöntemin klasik makine öğrenmesi teknikleri ve literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırması için kullanılan performans metrikleri ve deney sonuçları yer almaktadır. Son olarak Bölüm 4'te ise çalışma sonlandırılmaktadır.

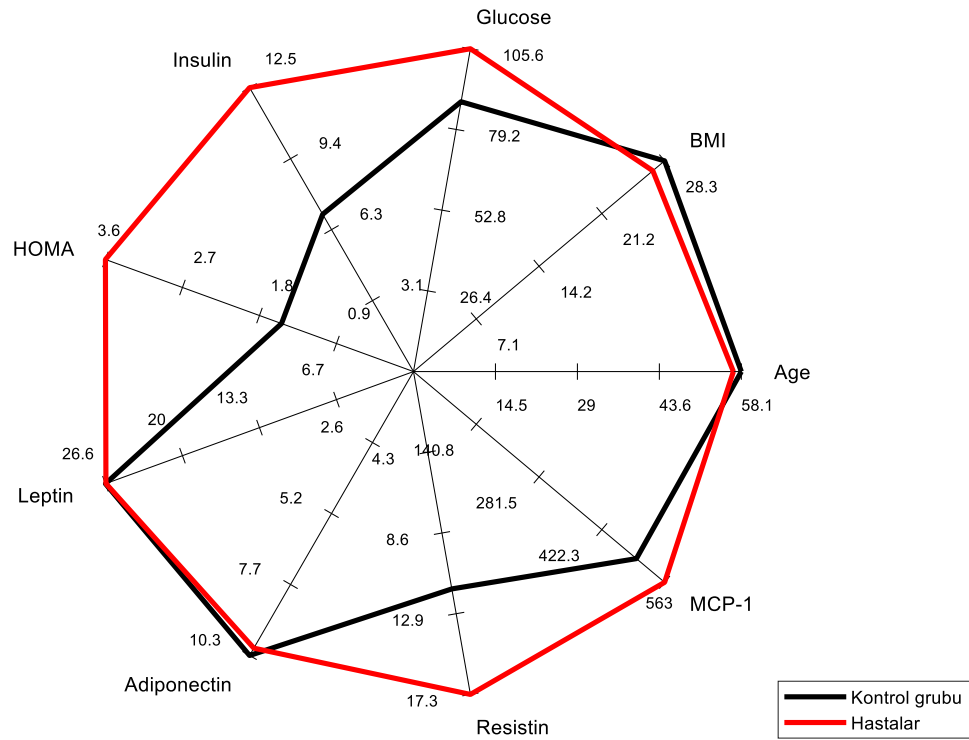
II. MATERYAL VE METOT

A. Veri Seti Açıklaması

Bu çalışmada hastalık teşhisi için Kaliforniya Üniversitesi - Irvine Makine Öğrenmesi Deposunda (Machine Learning Repository) açık erişimli olarak sunulan ve rutin kan analizi ile elde edilmiş olan BCCD veri seti kullanılmıştır [7,11]. Bu veri seti, 64'ü meme kanseri hastası ve 52'si sağlıklı (kontrol grubu bireyleri) olan 116 örneği içermektedir. Veri setinde Age (yaş), BMI, Glucose (glikoz), Insulin (insülin), HOMA, Leptin, Adiponectin (adiponektin), Resistin, MCP-1 ve hastaları veya sağlıklı kontrol grubunu gösteren bir ikili sınıf özelliği olan toplam dokuz nicel öznitelik vardır. Bu öznitelikleri içeren veri seti Tablo 1'de özetlenmiştir. Değişkenlerin numaralandırılması V1-V9 olacak şekilde azalan önem derecesini vurgulamaktadır. Diğer bir deyişle Glucose en yüksek önem derecesine sahip, MCP-1 ise en düşük öneme sahip özniteliktir [7]. Ayrıca hasta ve sağlıklı kontrol gruplarının klinik özelliklerinin ortalama profilleri Şekil 2'de daha iyi anlaşılması için grafiksel olarak sunulmuştur. Burada her radyal çizgi bir öznitelige (hasta grubu için kırmızı çizgi ve sağlıklı kontrol grubu için siyah çizgi) karşı düşmektedir.

Tablo 1. BCCD'nin özeti

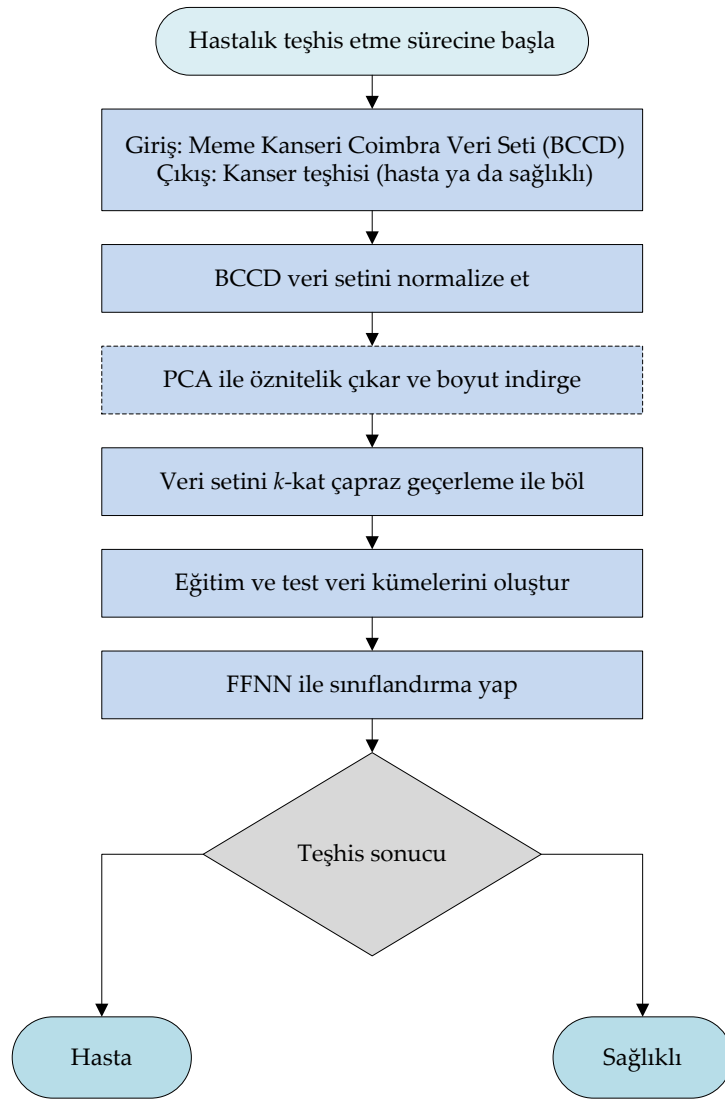
Öznitelik #	Değişken	Öznitelik adı	Birim
1	V3	Age	years
2	V4	BMI	kg/m ²
3	V1	Glucose	mg/dL
4	V7	Insulin	µU/mL
5	V5	HOMA	-
6	V6	Leptin	ng/mL
7	V8	Adiponectin	µg/mL
8	V2	Resistin	ng/mL
9	V9	MCP-1	pg/dL



Şekil 2. Hasta ve sağlıklı kontrol gruplarının klinik özelliklerinin ortalama profilleri

B. Önerilen Metot

Bu çalışmada PCA ve FFNN tekniklerine dayanan yeni bir kanser teşhisi yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu yöntemde ilk olarak BCDD veri seti algoritmaya giriş olarak verilir ve min-max normalizasyonu yapılır. Sonrasında PCA tekniği kullanılarak veri setinin öznitelikleri çıkarılır ve boyut indirgeme yapılmış olur. Ardından k-kat çapraz geçişleme metodu ile veri seti bölünerek eğitim ve test kümeleri oluşturulur. Son olarak FFNN tekniği ile sınıflandırma yapılarak teşhis sonucu (hasta/sağlıklı) elde edilir. Bu yöntemin temelini oluşturan PCA ve FFNN teknikleri sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 3. Kanseri teşhisi için önerilen yöntemin akış diyagramı

C. Temel Bileşen Analizi

PCA, şu ana kadar çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmış en bilinen boyut indirgeme tekniği türlerinden biridir ve pek çok uygulamada öznelik çıkarma ve boyut indirgeme amacıyla yoğun olarak kullanılmaktadır. PCA, çok sayıda ilişkili değişkeni ortogonal dönüşümler kullanarak daha küçük bir ilişkisiz kümeye dönüştüren çok değişkenli bir tekniktir [12, 13]. Bu teknik, her eksene asıl bileşen adı verilen ve orjinal verilerdeki değişkenlerin doğrusal bir birleşimi olarak adlandırılan ortogonal yeni bir uzay oluşturur. Nicel olarak titiz bir hesaplama ile elde edilen tüm temel bileşenler birbirine dik olduğundan bu yeni alanda bilgi fazlalığı yoktur [14]. PCA, birinci eksenin o eksen boyunca varyansı maksimize etmek için noktaların en büyük varyansı yönünde yerleştirildiği özel bir koordinat sistemi oluşturur [14]. Birincisine dik olan ikinci eksen, ilgili eksen boyunca olan varyansı maksimize eden ikinci temel bileşene karşılık gelir. Benzer bir biçimde diğer tüm temel bileşenler, kalan varyanstaki paylarını en üst düzeye çıkaracak şekilde oluşturulur. PCA tarafından dönüştürülen bu yeni temsil uzayında, temel bileşenler mümkün olan en büyük varyanstan en düşük olana kadar sıralanır, yani birinci bileşen her zaman en büyük varyansı açıklar ve onu takip edenler öncekinden daha küçük bir varyans değerini temsil eder [12].

Temel bileşenleri hesaplamak için gereken bağıntılar buradan sonra verilmiştir. $t=1,2, \dots, n$ için $\{x(t)\}$, uygun gelen örnekleri ve sıfır ortalamalı özellikleri içeren rastgele bir veri kümesi olsun. Bu durumda kovaryans matrisi R aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n [x(t) x(t)^T] \quad (1)$$

Aşağıdaki denklem, orijinal verilerdeki değişkenlerin doğrusal kombinasyonlarını, yani $x(t)$ 'den $y(t)$ 'ye lineer dönüşümü hesaplamak için kullanılabilir.

$$y(t) = M^T x(t) \quad (2)$$

Burada M , $n \times n$ boyutunda bir ortogonal matris ifade eder ve bu matrisin i . sütunu esasen i . özvektöre eşittir. Bu noktada, özdeğer problemi başlangıçta aşağıdaki denklem ile çözülecek şekilde ayarlanır:

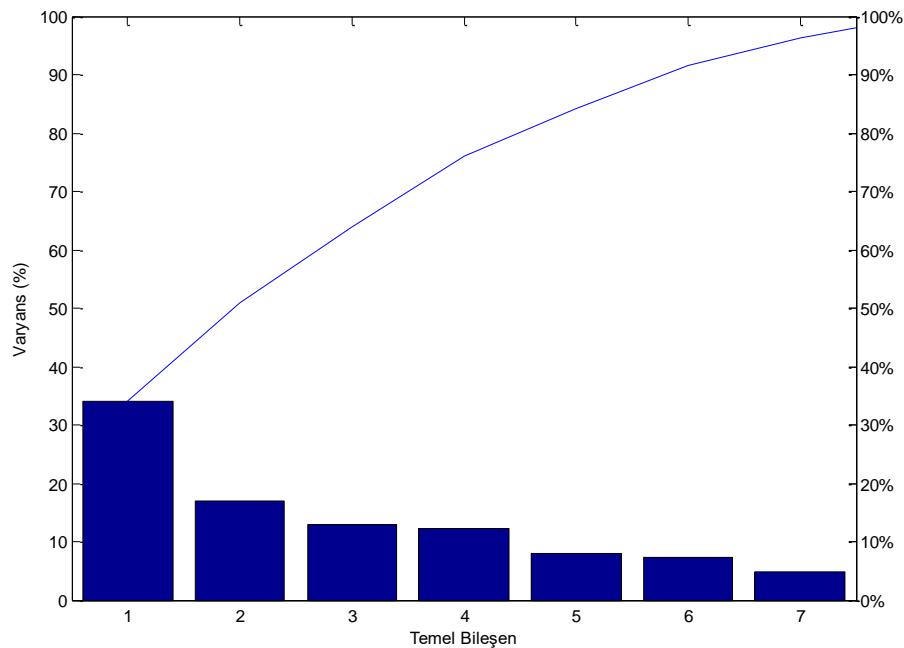
$$\lambda_i q_i = R q_i \quad (3)$$

Burada q_i özvektöre karşılık gelir ve λ_i ise R kovaryans matrisinin bir özdeğerini ifade eder ($\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n$). Denklem 3'e dayanarak temel bileşenler şu şekilde hesaplanır:

$$y_i(t) = q_i^T x(t), \quad i=1, \dots, n \quad (4)$$

Burada $y_i(t)$, i . temel bileşeni sembolize eder. Bu konu ile ilgili daha fazla bilgi için ilgili çalışmalara [12, 13] bakılabilir.

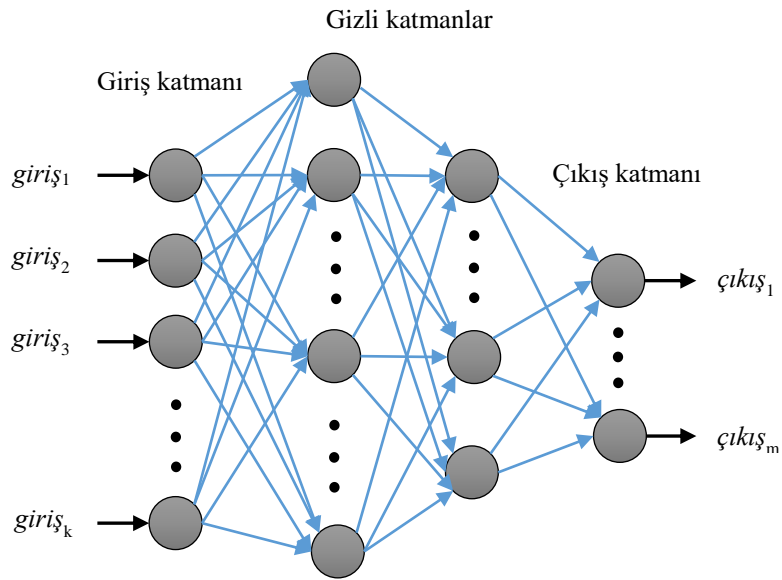
Şekil 4, yukarıda bahsedilen meme kanseri veri kümesi için hesaplanan her bir temel bileşen tarafından belirtilen varyans yüzdesini göstermektedir. Şekildeki grafik, toplam varyansın yaklaşık %95'ini açıklayan sadece ilk yedi bileşeni (toplam dokuz yerine) göstermektedir.



Şekil 4. Temel bileşenler tarafından belirtilen varyans yüzdeleri

D. İleri Beslemeli Sinir Ağı

FFNN genel yapısı Şekil 5'te gösterilmektedir. Mimariden görüldüğü üzere FFNN, iki veya daha fazla işlem katmanının birbiri ardına eklenmesiyle oluşmaktadır. İlk katman giriş katmanıdır ve ağ girişleri için bir kapı görevi yapar. Bu sinir ağı türünde birden fazla gizli katman olabilir. Bu katmanlar çözülecek problemle ilgili ana ve karmaşık ilişkileri barındıran nöronlardan oluşmaktadır. Her bir katmandaki işlem birimleri arasında ağırlıklar vardır. Bu ağırlıklar katmanlarda üretilen sonuçların bir sonraki katmana iletilmesini ve problemle ilgili dağıtık bir depolama mimarisinin olmasını sağlar. Son olarak çıkış katmanı, nihai yaklaşım ya da izdüşüm sonucunu üretir. Çok katmanlı FFNN ağlarında her katmanda bazı aktivasyon fonksiyonları vardır. Tüm katmanlar göz önünde bulundurulduğunda bileşik bir fonksiyon uygulaması olabilir. Dolayısıyla FFNN'nin sağladığı nihai yaklaşım sonucu bileşik bir fonksiyonla karakterize edilebilir [15-17]. Bu ağın çalışması ile ilgili daha ayrıntılı bilgi için [18, 19] kaynaklarından yararlanılabilir.



Şekil 5. FFNN'nin genel yapısı

E. Klasik Makine Öğrenmesi Teknikleri

Bu çalışmada önerilen yöntemin performansı klasik makine öğrenmesi teknikleriyle kıyaslanmıştır. Bu yöntemler şunlardır: Bayesian lojistik regresyon (Bayesian logistic regression) [20], Naive Bayes [21], lojistik regresyon [22], radyal tabanlı fonksiyon ağı (Radial Basis Function Network-RBFN) [23], stokastik dereceli azalma (Stochastic Gradient Descent-SGD) [24], SVM [25], voted perceptron [26], k -NN [27], K^* (K-yıldız) [28], AdaBoostM1 [29], OneR [30], decision stump [31], Hoeffding ağacı [32], C4.5 (J48) karar ağacı [33], lojistik model ağaçları (Logistic Model Trees-LMT) [34], Naive Bayes ile karar ağacı (Decision Tree with Naive Bayes) [35] ve rastgele ormanlar [36].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada önerilen yöntem ve karşılaştırma için kullanılan sınıflandırma teknikleri, Intel Core i7 8565U işlemci (1.80 GHz) ve 8 GB RAM ile Windows 10 Pro 64-bit işletim sisteminde çalışan Weka 3.8.3'te gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, karşılaştırma için kullanılan performans metriklerine, önerilen yöntemin klasik makine öğrenmesi teknikleri ve literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanmasına yer verilmektedir.

A. Karşılaştırma için Kullanılan Performans Metrikleri

Önerilen yöntemin ve klasik makine öğrenmesi tekniklerinin performansını değerlendirmek için kesinlik, duyarlılık, F-ölçütü ve sınıflandırma doğruluğu metrikleri kullanılmıştır. Doğru sınıflandırılmış test seti örneklerinin yüzdesi doğruluk olarak tanımlanır. Kesinlik ve duyarlılık metrikleri ise diğer performans ölçümleridir. F-skoru veya F_1 skoru olarak da adlandırılan F-ölçütü, prensipte kesinlik ve bütünlük metriklerinin harmonik ortalamasını temsil eden bir metriktir [37-40].

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (5)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (6)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (7)$$

$$\text{F-ölçütü} = \frac{2 \times \text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (8)$$

Burada TP (True Positives), TN (True Negatives), FP (False Positives) ve FN (False Negatives) dört olası neticeyi sembolize eder ve ilgili durumla sonuçlanan örnek sayılarını tutar. Bu konu hakkında daha fazla ayrıntı için okuyucular ilgili çalışmadan [41] faydalanabilir.

B. Klasik Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Karşılaştırma

Önerilen yöntemin ve literatürdeki klasik makine öğrenmesi tekniklerinin performansı kesinlik, duyarlılık, F-ölçütü ve sınıflandırma doğruluğu metrikleri açısından incelenmiştir. Deneyler farklı öznelik kombinasyonları üzerinde yapılarak önerilen yöntemin ve var olan tekniklerin başarısının performans metrikleri açısından nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Test için kullanılan öznelik kombinasyonları şu şekildedir: V1-V2, V1-V3, V1-V4, V1-V5, V1-V6 ve V1-V9. Önerilen yöntemin ve karşılaştırma için kullanılan sınıflandırma metodlarının parametreleri deneysel olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda önerilen yöntemdeki FFNN'nin gizli katmanındaki nöron sayısı farklı öznelik kombinasyonları için 10-300 aralığında olacak şekilde grid arama yaklaşımıyla optimize edilmiştir. Tablo 2-7'de önerilen yöntemin ve klasik makine öğrenmesi tekniklerinin farklı öznelik kombinasyonları için 10-kat çapraz geçerlemedeki performans metrik sonuçları verilmektedir. Tablo 2, V1-V2 durumu için olan performans sonuçlarını göstermektedir. Tablodan görüldüğü üzere normalizasyon adımından sonra PCA'nın uygulanması RBFN, SGD + SVM, voted perceptron, K*, OneR, decision stump, Hoeffding ağacı, C4.5 (J48) karar ağacı, LMT, Naive Bayes ile karar ağacı ve rastgele ormanlar tekniklerinin tüm metriklerdeki performansını artırmıştır. Lojistik regresyon, SGD + lojistik regresyon ve k -NN (normalizasyon için $k=26$, normalizasyon + PCA için $k=15$) tekniklerinde sınıflandırma doğruluğunun değişmemesine, diğer metriklerde ise aynı ya da çok yakın sonuç vermesine sebep olmuştur. Bayesian lojistik regresyon, Naive Bayes, SVM ve AdaBoostM1 + LMT yöntemlerinde genel olarak tüm metriklerde performans düşüşüne neden olmuştur. V1-V2 kombinasyonu için sadece normalizasyonun uygulandığı durumda önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=200) %76,7241'lik sınıflandırma doğruluğu ile diğer tüm tekniklerden daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü metriklerinde de en iyi performans sonuçları önerilen yöntem aittir. Normalizasyon adımından sonra PCA'nın uygulandığı durumda ise önerilen yöntemin (gizli katmandaki nöron sayısı=100) sınıflandırma doğruluğu OneR, decision stump ve C4.5 (J48) karar ağacı ile aynıdır. Diğer metriklerde ise bu tekniklerle aynı ya da çok yakın performans göstermiştir.

Tablo 2. Önerilen yöntemin ve klasik makine öğrenmesi tekniklerinin V1-V2 kombinasyonu için performans metrik sonuçları

Sınıflandırma Yöntemleri	Normalizasyon				Normalizasyon + PCA			
	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)
Bayesian lojistik regresyon [20]	0,747	0,733	0,722	73,2759	0,712	0,707	0,708	70,6897
Naive Bayes [21]	0,707	0,664	0,657	66,3793	0,718	0,655	0,643	65,5172
Lojistik regresyon [22]	0,693	0,690	0,690	68,9655	0,693	0,690	0,690	68,9655
RBFN [23]	0,741	0,741	0,740	74,1379	0,750	0,750	0,748	75,0000
SGD + SVM [24]	0,688	0,681	0,682	68,1034	0,718	0,707	0,707	70,6897
SGD + Lojistik regresyon [24]	0,707	0,707	0,707	70,6897	0,707	0,707	0,707	70,6897
SVM [25]	0,657	0,629	0,587	62,9310	0,606	0,560	0,425	56,0345
Voted perceptron [26]	0,561	0,569	0,523	56,8966	0,718	0,716	0,716	71,5517
k-NN [27]	0,741	0,741	0,741	74,1379	0,741	0,741	0,739	74,1379
K* [28]	0,680	0,681	0,680	68,1034	0,697	0,698	0,697	69,8276
AdaBoostM1 + LMT [29]	0,735	0,733	0,733	73,2759	0,689	0,690	0,686	68,9655
OneR [30]	0,629	0,629	0,629	62,9310	0,759	0,759	0,759	75,8621
Decision stump [31]	0,673	0,664	0,664	66,3793	0,762	0,759	0,755	75,8621
Hoeffding ağacı [32]	0,695	0,647	0,638	64,6552	0,718	0,655	0,643	65,5172
C4.5 (J48) karar ağacı [33]	0,654	0,655	0,647	65,5172	0,762	0,759	0,755	75,8621
LMT [34]	0,698	0,698	0,698	69,8276	0,733	0,733	0,733	73,2759
Naive Bayes ile karar ağacı [35]	0,681	0,681	0,675	68,1034	0,754	0,750	0,745	75,0000
Rastgele ormanlar [36]	0,662	0,664	0,660	66,3793	0,672	0,672	0,672	67,2414
Önerilen yöntem	0,770	0,767	0,764	76,7241	0,762	0,759	0,755	75,8621

V1-V3 kombinasyonu için olan performans sonuçları Tablo 3'te gösterilmektedir. Görüldüğü üzere sadece normalizasyonun uygulandığı durumda önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=200) RBFN ile birlikte %81,8966'lık doğruluk oranıyla en iyi sonuca sahiptir. Diğer metriklerde ise RBFN ile neredeyse aynı performansı göstermiştir. RBFN'nin dışındaki klasik makine öğrenmesi tekniklerinden ise tüm metriklerde daha iyi performans göstermiştir. PCA'nın uygulandığı durumda önerilen yöntemin (gizli katmandaki nöron sayısı=150) performansı tüm metriklerde k-NN (normalizasyon için k=10, normalizasyon + PCA için k=9) ve Naive Bayes ile karar ağacı tekniklerine çok yakındır.

Tablo 3. Önerilen yöntemin ve klasik makine öğrenmesi tekniklerinin V1-V3 kombinasyonu için performans metrik sonuçları

Sınıflandırma Yöntemleri	Normalizasyon				Normalizasyon + PCA			
	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)
Bayesian lojistik regresyon [20]	0,675	0,664	0,645	66,3793	0,751	0,750	0,750	75,0000
Naive Bayes [21]	0,688	0,655	0,651	65,5172	0,624	0,595	0,589	59,4828
Lojistik regresyon [22]	0,751	0,750	0,750	75,0000	0,751	0,750	0,750	75,0000
RBFN [23]	0,820	0,819	0,818	81,8966	0,724	0,724	0,721	72,4138
SGD + SVM [24]	0,716	0,716	0,716	71,5517	0,723	0,724	0,724	72,4138
SGD + Lojistik regresyon [24]	0,723	0,724	0,724	72,4138	0,732	0,733	0,732	73,2759
SVM [25]	0,748	0,672	0,627	67,2414	0,709	0,647	0,595	64,6552
Voted perceptron [26]	0,662	0,664	0,660	66,3793	0,712	0,707	0,708	70,6897
k-NN [27]	0,793	0,793	0,793	79,3103	0,828	0,828	0,827	82,7586
K* [28]	0,758	0,759	0,757	75,8621	0,742	0,741	0,738	74,1379
AdaBoostM1 + LMT [29]	0,732	0,733	0,732	73,2759	0,751	0,750	0,750	75,0000
OneR [30]	0,672	0,672	0,672	67,2414	0,596	0,595	0,595	59,4828
Decision stump [31]	0,673	0,664	0,664	66,3793	0,636	0,629	0,605	62,9310
Hoeffding ağacı [32]	0,694	0,664	0,660	66,3793	0,624	0,595	0,589	59,4828
C4.5 (J48) karar ağacı [33]	0,724	0,724	0,722	72,4138	0,762	0,759	0,755	75,8621
LMT [34]	0,732	0,733	0,732	73,2759	0,742	0,741	0,738	74,1379
Naive Bayes ile karar ağacı [35]	0,747	0,741	0,736	74,1379	0,821	0,810	0,806	81,0345
Rastgele ormanlar [36]	0,767	0,767	0,767	76,7241	0,784	0,784	0,784	78,4483
Önerilen yöntem	0,821	0,819	0,817	81,8966	0,806	0,802	0,799	80,1724

Tablo 4, V1-V4 kombinasyonu için olan performans sonuçlarını göstermektedir. Tablodan görüldüğü üzere normalizasyonun tek başına uygulandığı durumda en iyi performans sonuçları kesinlik için 0,810, duyarlılık için 0,810, F-ölçütü için 0,809 ve sınıflandırma doğruluğu için %81,0345 olmak üzere önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=30) aittir. Normalizasyon adımından sonra PCA'nın uygulandığı durumda ise önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=70) tüm metriklerde k-NN (normalizasyon için k=5, normalizasyon + PCA için k=3) ve RBFN tekniklerine çok yakın performans göstermiştir. Diğer tekniklerle kıyaslandığında ise tüm metriklerde daha iyi performansa sahiptir.

Tablo 4. Önerilen yöntemin ve klasik makine öğrenmesi tekniklerinin V1-V4 kombinasyonu için performans metrik sonuçları

Sınıflandırma Yöntemleri	Normalizasyon				Normalizasyon + PCA			
	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)
Bayesian lojistik regresyon [20]	0,708	0,707	0,702	70,6897	0,733	0,733	0,733	73,2759
Naive Bayes [21]	0,713	0,681	0,678	68,1034	0,691	0,681	0,682	68,1034
Lojistik regresyon [22]	0,743	0,741	0,742	74,1379	0,743	0,741	0,742	74,1379
RBFN [23]	0,793	0,793	0,792	79,3103	0,819	0,819	0,818	81,8966
SGD + SVM [24]	0,743	0,741	0,742	74,1379	0,695	0,690	0,690	68,9655
SGD + Lojistik regresyon [24]	0,698	0,698	0,698	69,8276	0,716	0,716	0,716	71,5517
SVM [25]	0,671	0,672	0,668	67,2414	0,672	0,672	0,672	67,2414
Voted perceptron [26]	0,646	0,647	0,638	64,6552	0,759	0,759	0,759	75,8621
<i>k</i> -NN [27]	0,801	0,802	0,801	80,1724	0,829	0,828	0,828	82,7586
K* [28]	0,697	0,698	0,697	69,8276	0,735	0,724	0,714	72,4138
AdaBoostM1 + LMT [29]	0,759	0,759	0,759	75,8621	0,732	0,733	0,731	73,2759
OneR [30]	0,672	0,672	0,672	67,2414	0,526	0,517	0,518	51,7241
Decision stump [31]	0,673	0,664	0,664	66,3793	0,526	0,483	0,437	48,2759
Hoeffding ağacı [32]	0,707	0,672	0,668	67,2414	0,691	0,681	0,682	68,1034
C4.5 (J48) karar ağacı [33]	0,690	0,690	0,690	68,9655	0,697	0,698	0,695	69,8276
LMT [34]	0,724	0,724	0,724	72,4138	0,674	0,672	0,673	67,2414
Naive Bayes ile karar ağacı [35]	0,751	0,750	0,747	75,0000	0,616	0,612	0,613	61,2069
Rastgele ormanlar [36]	0,767	0,767	0,766	76,7241	0,758	0,759	0,758	75,8621
Önerilen yöntem	0,810	0,810	0,809	81,0345	0,802	0,802	0,800	80,1724

V1-V5 kombinasyonu için olan performans sonuçları Tablo 5'te gösterilmektedir. Sadece normalizasyonun uygulandığı durumda önerilen yöntemin (gizli katmandaki nöron sayısı=200) performansı tüm metriklerde *k*-NN (normalizasyon için *k*=8, normalizasyon + PCA için *k*=5) tekniğine yakındır. *k*-NN'nin dışındaki klasik makine öğrenmesi tekniklerinden ise tüm metriklerde daha iyi performans göstermiştir. PCA'nın uygulandığı durumda önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=250) RBFN ile birlikte %80,1724'lük sınıflandırma doğruluğu ile en iyi sonuca sahiptir. Diğer metriklerde ise RBFN ile yaklaşık olarak aynı performansı göstermiştir.

Tablo 5. Önerilen yöntemin ve klasik makine öğrenmesi tekniklerinin V1-V5 kombinasyonu için performans metrik sonuçları

Sınıflandırma Yöntemleri	Normalizasyon				Normalizasyon + PCA			
	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)
Bayesian lojistik regresyon [20]	0,715	0,716	0,714	71,5517	0,762	0,759	0,759	75,8621
Naive Bayes [21]	0,678	0,612	0,595	61,2069	0,682	0,655	0,652	65,5172
Lojistik regresyon [22]	0,769	0,767	0,768	76,7241	0,769	0,767	0,768	76,7241
RBFN [23]	0,786	0,784	0,785	78,4483	0,802	0,802	0,802	80,1724
SGD + SVM [24]	0,743	0,741	0,742	74,1379	0,688	0,681	0,682	68,1034
SGD + Lojistik regresyon [24]	0,741	0,741	0,741	74,1379	0,682	0,681	0,681	68,1034
SVM [25]	0,680	0,681	0,678	68,1034	0,679	0,681	0,679	68,1034
Voted perceptron [26]	0,712	0,707	0,699	70,6897	0,718	0,716	0,716	71,5517
<i>k</i> -NN [27]	0,829	0,828	0,828	82,7586	0,793	0,793	0,792	79,3103
K* [28]	0,647	0,647	0,647	64,6552	0,768	0,767	0,767	76,7241
AdaBoostM1 + LMT [29]	0,707	0,707	0,707	70,6897	0,708	0,707	0,707	70,6897
OneR [30]	0,672	0,672	0,672	67,2414	0,609	0,612	0,600	61,2069
Decision stump [31]	0,673	0,664	0,664	66,3793	0,515	0,509	0,510	50,8621
Hoeffding ağacı [32]	0,678	0,612	0,595	61,2069	0,671	0,647	0,644	64,6552
C4.5 (J48) karar ağacı [33]	0,690	0,690	0,690	68,9655	0,607	0,603	0,604	60,3448
LMT [34]	0,716	0,716	0,716	71,5517	0,757	0,750	0,751	75,0000
Naive Bayes ile karar ağacı [35]	0,715	0,716	0,713	71,5517	0,636	0,638	0,636	63,7931
Rastgele ormanlar [36]	0,784	0,784	0,784	78,4483	0,767	0,767	0,766	76,7241
Önerilen yöntem	0,812	0,810	0,809	81,0345	0,801	0,802	0,801	80,1724

Tablo 6, V1-V6 kombinasyonu için olan performans sonuçlarını göstermektedir. Normalizasyonun tek başına uygulandığı durumda önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=280) *k*-NN (normalizasyon için *k*=10, normalizasyon + PCA için *k*=28) ile birlikte %81,0345'lik doğruluk oranı ile en iyi sonuca sahiptir. Diğer metriklerde ise *k*-NN ile neredeyse aynı performansı göstermiştir. Normalizasyon adımından sonra PCA'nın uygulandığı durumda ise en iyi performans sonuçları sınıflandırma doğruluğu için %83,6207, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü için 0,836 olmak üzere önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=200) aittir.

Tablo 6. Önerilen yöntemin ve klasik makine öğrenmesi tekniklerinin V1-V6 kombinasyonu için performans metrik sonuçları

Sınıflandırma Yöntemleri	Normalizasyon				Normalizasyon + PCA			
	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)
Bayesian lojistik regresyon [20]	0,706	0,707	0,705	70,6897	0,764	0,759	0,759	75,8621
Naive Bayes [21]	0,671	0,603	0,584	60,3448	0,651	0,647	0,647	64,6552
Lojistik regresyon [22]	0,771	0,767	0,768	76,7241	0,762	0,759	0,759	75,8621
RBFN [23]	0,777	0,776	0,776	77,5862	0,813	0,810	0,811	81,0345
SGD + SVM [24]	0,737	0,733	0,733	73,2759	0,708	0,707	0,707	70,6897
SGD + Lojistik regresyon [24]	0,752	0,750	0,751	75,0000	0,691	0,690	0,690	68,9655
SVM [25]	0,644	0,647	0,644	64,6552	0,637	0,638	0,637	63,7931
Voted perceptron [26]	0,629	0,629	0,629	62,9310	0,698	0,690	0,690	68,9655
k-NN [27]	0,810	0,810	0,810	81,0345	0,750	0,750	0,750	75,0000
K* [28]	0,680	0,672	0,673	67,2414	0,723	0,724	0,723	72,4138
AdaBoostM1 + LMT [29]	0,680	0,681	0,680	68,1034	0,708	0,707	0,707	70,6897
OneR [30]	0,672	0,672	0,672	67,2414	0,489	0,491	0,490	49,1379
Decision stump [31]	0,673	0,664	0,664	66,3793	0,456	0,457	0,456	45,6897
Hoeffding ağacı [32]	0,684	0,621	0,605	62,0690	0,651	0,647	0,647	64,6552
C4.5 (J48) karar ağacı [33]	0,691	0,690	0,690	68,9655	0,672	0,672	0,672	67,2414
LMT [34]	0,733	0,733	0,733	73,2759	0,771	0,767	0,768	76,7241
Naive Bayes ile karar ağacı [35]	0,715	0,716	0,713	71,5517	0,680	0,681	0,680	68,1034
Rastgele ormanlar [36]	0,741	0,741	0,740	74,1379	0,759	0,759	0,757	75,8621
Önerilen yöntem	0,812	0,810	0,809	81,0345	0,836	0,836	0,836	83,6207

Tüm özniteliklerin kullanıldığı V1-V9 kombinasyonu için olan performans sonuçları Tablo 7’de gösterilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere sadece normalizasyonun uygulandığı durumda önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=150) AdaBoostM1 + LMT ve k-NN (normalizasyon için k=7, normalizasyon + PCA için k=5) teknikleri ile birlikte %76,7241’lik doğruluk oranıyla en iyi sonuca sahiptir. Diğer metriklerde ise bu iki teknik ile yaklaşık olarak aynı performansı göstermiştir. PCA’nın uygulandığı durumda ise önerilen yöntem (gizli katmandaki nöron sayısı=150) tüm metriklerde Bayesian lojistik regresyon tekniğine çok yakın performans göstermiştir.

Tablo 7. Önerilen yöntemin ve klasik makine öğrenmesi tekniklerinin V1-V9 kombinasyonu için performans metrik sonuçları

Sınıflandırma Yöntemleri	Normalizasyon				Normalizasyon + PCA			
	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	Doğruluk (%)
Bayesian lojistik regresyon [20]	0,662	0,664	0,662	66,3793	0,786	0,784	0,785	78,4483
Naive Bayes [21]	0,662	0,603	0,587	60,3448	0,627	0,612	0,612	61,2069
Lojistik regresyon [22]	0,733	0,733	0,733	73,2759	0,768	0,767	0,767	76,7241
RBFN [23]	0,744	0,741	0,742	74,1379	0,725	0,724	0,725	72,4138
SGD + SVM [24]	0,725	0,716	0,716	71,5517	0,736	0,724	0,725	72,4138
SGD + Lojistik regresyon [24]	0,732	0,733	0,732	73,2759	0,718	0,716	0,716	71,5517
SVM [25]	0,676	0,672	0,673	67,2414	0,662	0,664	0,662	66,3793
Voted perceptron [26]	0,663	0,664	0,657	66,3793	0,661	0,655	0,656	65,5172
k-NN [27]	0,769	0,767	0,768	76,7241	0,768	0,741	0,740	74,1379
K* [28]	0,609	0,595	0,594	59,4828	0,656	0,647	0,647	64,6552
AdaBoostM1 + LMT [29]	0,771	0,767	0,768	76,7241	0,718	0,716	0,716	71,5517
OneR [30]	0,653	0,655	0,652	65,5172	0,519	0,517	0,518	51,7241
Decision stump [31]	0,673	0,664	0,664	66,3793	0,465	0,457	0,458	45,6897
Hoeffding ağacı [32]	0,662	0,603	0,587	60,3448	0,617	0,603	0,603	60,3448
C4.5 (J48) karar ağacı [33]	0,691	0,690	0,690	68,9655	0,649	0,638	0,638	63,7931
LMT [34]	0,693	0,690	0,690	68,9655	0,777	0,776	0,776	77,5862
Naive Bayes ile karar ağacı [35]	0,680	0,681	0,678	68,1034	0,647	0,647	0,647	64,6552
Rastgele ormanlar [36]	0,732	0,733	0,731	73,2759	0,749	0,750	0,749	75,0000
Önerilen yöntem	0,767	0,767	0,766	76,7241	0,776	0,776	0,776	77,5862

C. Literatürdeki Çalışmalar ile Karşılaştırma

BCCD veri seti çok yeni olduğundan onu kullanan az sayıda çalışma vardır. Bu bölümde, literatürde yer alan çalışmalarda elde edilen performans sonuçları önerilen yönteminkiyle karşılaştırılmaktadır. Önerilen yöntemin performansının AUC ve sınıflandırma doğruluğu açısından mevcut çalışmalarla kıyaslanmasına Tablo 8’de yer verilmektedir. Tabloda görüldüğü üzere var olan çalışmaların sınıflandırma doğruluğu başarıları yaklaşık %74 ile %80 arasındadır. Bu çalışmada önerilen yöntem ise %83,62’lik başarı oranı ile literatürdeki çalışmalardan daha iyi performans göstermiştir.

Tablo 8. Önerilen yöntemin performansının literatürdeki çalışmalarla kıyaslanması

Çalışma	Metotlar	AUC	Doğruluk (%)
Patricio vd. [7]	Lojistik regresyon – Rastgele ormanlar – SVM	0,87-0,91	-
Li ve Chen [8]	Rastgele ormanlar	0,785	74,30
Livieris vd. [9]	Geliştirilmiş CST-oylama	-	79,69
Aslan vd. [10]	ELM	-	80,00
Önerilen yöntem	PCA + FFNN		83,62

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kanser, insan ölümlerinin en büyük sebeplerinden birisidir. Meme kanseri ise kadınlar arasındaki kanser ölümlerinin başlıca nedenidir. Erken teşhis ile bu kanser türü sebebiyle yaşanan ölüm oranları düşürülebilir. Hastalıklara erken tanı koymada doktorlara yardımcı olmak amacıyla uzman sistemler, yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılmaktadır. Erken teşhis, özellikle meme kanseri hastalığında ölüm riskini azaltmada çok büyük rol oynamaktadır. Bu çalışmanın ana amacı doktorlara hastalıkları erken teşhis etmede yardımcı olacak bir kanser teşhisi yöntemi önermektir. PCA ve FFNN teknikleri temel alınarak önerilen yöntemin performansı; BCCD veri seti üzerinde sınıflandırma doğruluğu, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü metrikleri kullanılarak incelenerek, klasik makine öğrenmesi teknikleri ve literatürdeki çalışmalar ile ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın deneysel sonuçları önerilen yöntemin etkili bir kanser erken teşhis aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] International Agency for Research on Cancer. (2020). <https://www.iarc.fr/>, (25.05.2020).
- [2] Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R. L., Torre, L. A., & Jemal, A. (2018). Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 68(6), 394-424.
- [3] World Health Organization. (2020). <https://www.who.int/>, (25.05.2020).
- [4] New Global Cancer Data: GLOBOCAN 2018. (2020). <https://www.uicc.org/new-global-cancer-data-globocan-2018>, (25.05.2020).
- [5] Eyupoglu, C. (2018). Breast cancer classification using k-nearest neighbors algorithm. *The Online Journal of Science and Technology*, 8(3), 29-34.
- [6] Jeleń, Ł., Krzyżak, A., Fevens, T., & Jeleń, M. (2016). Influence of feature set reduction on breast cancer malignancy classification of fine needle aspiration biopsies. *Computers in Biology and Medicine*, 79, 80-91.
- [7] Patrício, M., Pereira, J., Crisóstomo, J., Matafome, P., Gomes, M., Seiça, R., & Caramelo, F. (2018). Using Resistin, glucose, age and BMI to predict the presence of breast cancer. *BMC Cancer*, 18(1), 29.
- [8] Li, Y., & Chen, Z. (2018). Performance evaluation of machine learning methods for breast cancer prediction. *Applied and Computational Mathematics*, 7(4), 212-216.
- [9] Livieris, I., Pintelas, E., Kanavos, A., & Pintelas, P. (2018). An improved self-labeled algorithm for cancer prediction. *Advances in Experimental Medicine and Biology*.
- [10] Aslan, M. F., Celik, Y., Sabanci, K., & Durdu, A. (2018). Breast cancer diagnosis by different machine learning methods using blood analysis data. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 6(4), 289-293.
- [11] Patrício, M., Pereira, J., Crisóstomo, J., Matafome, P., Gomes, M., Seiça, R., & Caramelo, F. (2018). *Breast Cancer Coimbra Data Set*. UCI Machine Learning Repository. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Breast+Cancer+Coimbra>, (25.05.2020).
- [12] Salo, F., Nassif, A. B., & Essex, A. (2019). Dimensionality reduction with IG-PCA and ensemble classifier for network intrusion detection. *Computer Networks*, 148, 164-175.
- [13] Jackson, J. E. (2005). *A user's guide to principal components*. John Wiley & Sons.
- [14] MathWorks. (2018). *Statistics and Machine Learning Toolbox*. The MathWorks Inc.

- [15] Yavuz, E., & Eyüpoğlu, C. Meme Kanseri Teşhisi İçin Yeni Bir Skor Füzyon Yaklaşımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1045-1060.
- [16] Yavuz, E., Eyupoglu, C., Sanver, U., & Yazici, R. (2017). An ensemble of neural networks for breast cancer diagnosis. *2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, pp. 538-543, 5-8 October, Antalya, Turkey.
- [17] Yavuz, E., Kasapbaşı, M. C., Eyüpoğlu, C., & Yazıcı, R. (2018). An epileptic seizure detection system based on cepstral analysis and generalized regression neural network. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 38(2), 201-216.
- [18] Du, K. L., & Swamy, M. N. S. (2006). *Neural Networks in a Softcomputing Framework*. Springer Science & Business Media.
- [19] Schalkoff, R. J. (1997). *Artificial Neural Networks*. McGraw-Hill.
- [20] Genkin, A., Lewis, D. D., & Madigan, D. (2007). Large-scale Bayesian logistic regression for text categorization. *Technometrics*, 49(3), 291-304.
- [21] John, G. H., & Langley, P. (1995). Estimating continuous distributions in Bayesian classifiers. *10th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI'95)*, pp. 338-345, 18-20 August, Montréal, Qué, Canada.
- [22] Le Cessie, S., & Van Houwelingen, J. C. (1992). Ridge estimators in logistic regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 41(1), 191-201.
- [23] Frank, E. (2014). *Fully supervised training of Gaussian radial basis function networks in WEKA*. Department of Computer Science, University of Waikato, Hamilton, New Zealand.
- [24] Robbins, H., & Monro, S. (1951). A stochastic approximation method. *The Annals of Mathematical Statistics*, 22(3), 400-407.
- [25] Keerthi, S. S., Shevade, S. K., Bhattacharyya, C., & Murthy, K. R. K. (2001). Improvements to Platt's SMO algorithm for SVM classifier design. *Neural Computation*, 13(3), 637-649.
- [26] Freund, Y., & Schapire, R. E. (1999). Large margin classification using the perceptron algorithm. *Machine Learning*, 37(3), 277-296.
- [27] Aha, D. W., Kibler, D., & Albert, M. K. (1991). Instance-based learning algorithms. *Machine Learning*, 6(1), 37-66.
- [28] Cleary, J. G., & Trigg, L. E. (1995). K*: An instance-based learner using an entropic distance measure. *12th International Conference on Machine Learning*, pp. 108-114, 9-12 July, Tahoe City, California.
- [29] Freund, Y., & Schapire, R. E. (1996). Experiments with a new boosting algorithm. *13th International Conference on Machine Learning*, pp: 148-156, 3-6 July, Bari, Italy.
- [30] Holte, R. C. (1993). Very simple classification rules perform well on most commonly used datasets. *Machine Learning*, 11(1), 63-90.
- [31] Iba, W., & Langley, P. (1992). Induction of one-level decision trees. *9th International Conference on Machine Learning*, pp. 233-240, 1-3 July, Aberdeen, Scotland.
- [32] Hulten, G., Spencer, L., & Domingos, P. (2001). Mining time-changing data streams. *7th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 97-106, 26-29 August, San Francisco, California.

- [33] Quinlan, R. (1993). *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA.
- [34] Landwehr, N., Hall, M., & Frank, E. (2005). Logistic model trees. *Machine Learning*, 59(1-2), 161-205.
- [35] Kohavi, R. (1996). Scaling up the accuracy of naive-bayes classifiers: A decision-tree hybrid. *2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 202-207, 2-4 August, Portland, Oregon.
- [36] Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- [37] Eyüpoğlu, C. (2018). *Büyük veride etkin gizlilik koruması için yazılım tasarımı*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [38] Yavuz, E., & Eyupoglu, C. (2019). A cepstrum analysis-based classification method for hand movement surface EMG signals. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 57(10), 2179-2201.
- [39] Eyupoglu, C., Aydin, M. A., Zaim, A. H., & Sertbas, A. (2018). An efficient big data anonymization algorithm based on chaos and perturbation techniques. *Entropy*, 20(5), 373.
- [40] Yavuz, E., & Eyupoglu, C. (2020). An effective approach for breast cancer diagnosis based on routine blood analysis features. *Medical & Biological Engineering & Computing*. <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02187-9>
- [41] Sokolova, M., & Lapalme, G. (2009). A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management*, 45(4), 427-437.

Araştırma Makalesi - Research Article

Rijitleştirme Levhaları ile Güçlendirilmiş Silindirik Çelik Siloların Yapısal Davranışının İncelenmesi

Mehmet Erkan Efe^{1*}, İlyas Devran Çelik²

Geliş / Received: 27/05/2020

Revize / Revised: 19/07/2020

Kabul / Accepted: 14/09/2020

ÖZ

Silolar dışarıdan veya içeriden gelebilecek her türlü etkiye karşı doluluk oranlarına göre farklı reaksiyonlar gösterebilen ince kesitli narin yapılardır. Silo yapıları farklı depolama ihtiyaçları için farklı malzemeler ile farklı büyüklüklerde üretilebilmektedirler. Büyük çaplı silolarda yapı ağırlığının büyük kısmını depolanan materyal oluşturmaktadır. Taşıyıcı sistem ağırlığına kıyasla boyutları ile öne çıkmaktadır. Büyük çaplı silolarda boyutsal parametreler göz önüne alındığında dış etkenlerden başlıca rüzgâr gibi çevresel etkenler yapıya büyük bir yük etkilemektedir. Öte yandan, depolanan materyalin karakteristik özellikleri içsel etkiler üzerinde büyük bir etken durumundadır. Sıvı depolaması için başlıca sorun teşkil eden problemlerden bir tanesi, sıvı depolanmasında meydana gelebilecek dinamik bir yük olan çalkantı durumudur. Bu çalışma kapsamında silindirik, çelik sıvı depolama siloları sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Silo yüksekliğinin eşit tutulduğu üç farklı çap boyutunda aynı sıvı yüksekliği için oluşturulan farklı kombinasyonlarda rijitleştirme levhalara sahip on iki sayısal model oluşturulup statik yük koşulları altında sayısal analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup levha etkinliklerinin kombinasyonlar arasında ve çap farklılıklarına göre değişimi yorumlanmıştır. Analizler sonucunda çalışmada dikkate alınan rijitleştirme levhalarının etkinliğinin silo çapı ile arasında boyutsal bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak silo çapı ile birlikte levha boyutlarının (boyut ve cidar kalınlığı) da değiştirilmesinin yapı rijitliğine katkı sağlayacağı önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler- Silo Yapıları, Doğrusal Olmayan Analiz, Sonlu Elemanlar Modeli ile Analiz, Silolarda Deprem ve Rüzgâr Yükleri

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: mefe3234@gmail.com (<http://orcid.org/0000-0001-8198-9997>)

²İletişim: devrancelik@sdu.edu.tr (<http://orcid.org/0000-0001-9011-4041>)

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

Investigation of Structural Behavior of Cylindrical Steel Silos Reinforced with Stiffening Plates

ABSTRACT

Silos are slender structures with thin sections that can react differently according to the fullness ratios against any impact that may come from inside or outside. Silo structures can be manufactured in a variety of materials and sizes for different storage needs. In large diameter silos, most of the weight of the structure is the stored material. The load carrying system stands out with its dimensions rather than its weight. Considering the dimensional parameters of large diameter silos, external factors, such as wind affects the structure highly. On the other hand, the type and characteristics of the stored material changes the internal loading conditions drastically. One of the main problems of these situations is the sloshing, which is a dynamic load that can occur in fluid storage. In this paper, cylindrical steel liquid storage silos are discussed. Twelve numerical models with different plate combinations created for three different diameter sizes are created with the consideration of same amount of stored liquid and silo height for all models. Created models are analyzed under dynamic and static loads. The results of the analysis are examined comparatively, and the variation of plate efficiency between combinations and diameter differences are interpreted. From the analysis results, it has been determined that the effectiveness of the stiffening plates is in dimensional relation with the silo diameter. In conclusion, it is suggested that altering the plate dimensions (size and thickness) along with the silo diameter will contribute to the rigidity of the structure.

Keywords- *Silo Structures, Non-Linear Analysis, Finite Element Model Analysis, Wind and Quake Loads in Silos*

I.GİRİŞ

Sıvı depolama tankları genel ve endüstriyel alanlarda önemli bir yer tutmaktadırlar. Kentsel su depolaması ve yangın karşıtı sistemlerde kritik bir öneme sahiptirler. Pek çok endüstriyel alanda kimyasalların ve diğer sıvıların depolanmasında yer almaktadırlar.

Silo tipi yapıların geometrileri ve taşıyıcı sistem tasarımları, depolanması planlanan sıvı veya katı materyalin özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir [1].

Duvar yüksekliği boyunca oluşan kuvvetlerin büyüklükleri ve dağılımları, depolanan materyalin özelliklerine ve silonun doldurulma veya boşaltım aşamasında olmasına bağlıdır. Ayrıca tasarım aşamasında deprem, rüzgâr, silo yüzeyi ve depolanan malzeme arasındaki sıcaklık farkı, depolanan içeriğin potansiyel şişmesi gibi durumlardan kaynaklanabilecek gerilmelere karşı dikkat edilmelidir [2].

İnce oluklu duvarlı silindirik metal silolar genellikle silo çevresine üniform olarak yerleştirilen dikey rijitleştiriciler ile güçlendirilirler. Bu tip silolarda yatay oluklu duvarlar, yatay duvar sürtünmelerinden oluşan çekme kuvvetlerini taşımaktayken, dikey kolonlar yığın katıların sürtünme çekişi sonucu dikeyde oluşturduğu basınç kuvvetlerini taşımaktadır. Burkulma sorunları dikey duvar yüklerinden kaynaklanmaktadır. İnce duvarlı silindirik silolar, duvar burkulmasını önleyen, rüzgâr ve deprem kuvvetlerine karşı rijitlik sağlayan dikey rijitleştiriciler olmadan nadiren kullanılmaktadır [3].

Depolanan materyal yapıda hidrostatik, yatay ve dikey ve basınç etkileri oluşturmaktadır. Tank içerisinde meydana gelebilecek etkilerin en önemlilerinden biri sıvı çalkantısıdır. Sıvı çalkantısı çeşitli dinamik sistemlerde mühendislik problemleri oluşturabilmektedir. Tam dolu olmayan tanklarda, tankın hareket periyodu tankın doğal titreşim periyoduna yaklaştığında, çalkalanma etkisi başlamaktadır. Bu sebeple, çalkalanma hareketinin başlayacağı periyot değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Çalkantı hareketi serbest sıvı yüzeyinin bulunduğu her tankta meydana gelebilir. Tankın şekli ve dağılıma bağlı olarak serbest sıvı yüzeyi; simetrik, asimetrik, rasgele çarpışmalar, yarı periyodik ve kaotik gibi birçok şekli olabilir. Çalkantı hareketinin genliği tank hareketinin frekansına ve genliğine, sıvı derinliğine, sıvının mekanik özelliklerine ve tank geometrisine göre değişkenlik gösterebilmektedir [4].

DeneySEL çalışmalarda perde (levha) kullanımının ve perde yerleşimlerinde yapılan düzenlemelerin tanker duvarlarındaki ortalama ve maksimum basınçları azalttığına ve perdelerin yatay ve dikey olarak birlikte kullanıldıkları durumda daha verimli olduğuna değinmişlerdir [5]. Hareketlendirme parametrelerinin sistematik değiştirildiği bir çalışmada perdelerin sıvı hareketini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, çalkantı esnasında en yoğun darbelerin serbest sıvı düzeyinde veya tank duvarındaki dik kesişimlerde meydana geldiğine ve deneySEL araştırmalarda sıvı viskozitesi ve çarpma basınçlarının göz önünde bulundurulmasının gerektiğine değinmişlerdir [6]. Tank içindeki çalkantı hareketinin, tank hareketinin, sıvı derinliği ve yoğunluğunun, tank şeklinin bir fonksiyonuna bağlı olduğunu araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneyler göstermiştir. Ayrıca tank içindeki çalkantı hareketi son yıllarda birçok çalışmada konu edinilmiştir [7-9].

Literatürde geçen araştırmalarda depolanan sıvının taban tarafında yapı ile birlikte hareketini gerçekleştirdiği, sıvı serbest yüzey tarafında ise periyodu yüksek bir hareket ile çalkalanmaya maruz kaldığına değinilmiştir [10].

Çalışmalarında, belirli bir hareket frekansı için sıvı serbest yüzeyindeki yerdeğiştirmenin maksimum olduğu durumun tankın doluluk oranının az olduğu bir durum olduğuna yani sıvı yüksekliği arttıkça çalkantının azaldığına değinmişlerdir. Bu duruma sebep olarak duvarlara gelen etkiyi azaltan, sıvının kendini sönümlenme özelliğini göstermişlerdir. Ayrıca belirtmişlerdir ki, problemin non-linear olan doğası analitik ve sayısal bir çözüm üretilmesi konusunda zorluklar çıkartmaktadır. Bu sebeple bazı varsayımlarda bulunmak gerekmektedir. Bu durum ise elde edilen verileri gerçek durum ve sonuçlardan biraz uzaklaştırmaktadır. Bu sebepten dolayı deneySEL çözümler çalkantı hareketinin incelenmesinde büyük bir rol oynamaktadır [11].

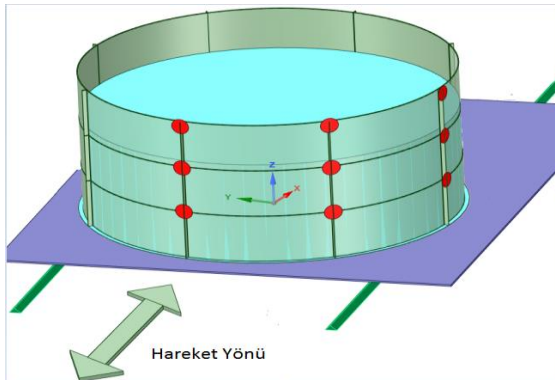
Rezonans durumundaki sıvı çalkantısının yapısal stabilite ve saklama yapısının duvarları için risk oluşturabilmektedir. Gözenekli levhalar ile çalkantı durumuna karşı enerji sönümlenmesinin yapılabileceği ve çalkantı hareketinin duvarlara uygulayabileceği kuvvetin azaltılabileceğine değinmişlerdir [12].

Yapmış oldukları çalışmada sabit çap ve yükseklik için farklı levha yerleşimlerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Analizleri sonucunda silo geometrisine yakın bir geometride levha kullanımının daha eşdağılımlı bir sonuç verdiğine değinmişlerdir. Sadece düşey levha kullanımının olduğu modelde davranışın bozulduğunu, yatay levhaların şekil değiştirmeyi sınırladığını ve en uygun sonuçların yatay ve düşey levhaların birlikte kullanıldığı durumlardan elde edildiğini belirtmişlerdir [13].

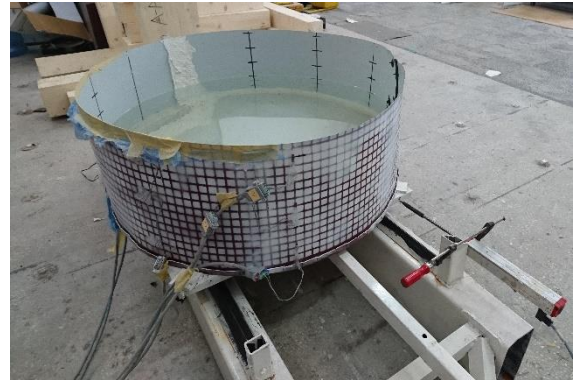
Çalışmamızda silo tipi bir çelik yapı farklı boyut ve yerleşim düzenindeki rijtleştirme levhalarının birer kombinasyonu halinde güçlendirilmiştir. Kullanılmış olan levha boyutları ve yerleşim şekilleri için elede edilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Analizlerde silo yüksekliği, sıvı yüksekliği ve levha özellikleri sabit tutulmuş olup silo modellerinin çapları büyütülmüştür. Aynı çap grupları kendi içlerinde seri olarak adlandırılmıştır. Modeller çap serileri ve levha kombinasyonları baz alınarak grafiklerle karşılaştırılmıştır.

II.MATERYAL VE YÖNTEM

Sayısal ve deneysel olarak yapılan bu çalışmada; sarsmatablası kaynaklı hareketlenmeye maruz kalan silo tipi çelik yapıların sıvı çalkantısına bağlı yapısal davranışın incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; silo yapısında maksimum çalkantı hareketini sağlayacak olan etkin su seviyesini belirleyebilmek için deneysel bir model oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan model boyutları 400mm yükseklik ve 1000mm çap için 0,5mm cidar kalınlığındaki S235 çelik sınıfına sahip uniform saç malzemeden tasarlanmıştır. Şekil 1'de oluşturulan deneysel modelin genel görünümü verilmiştir.



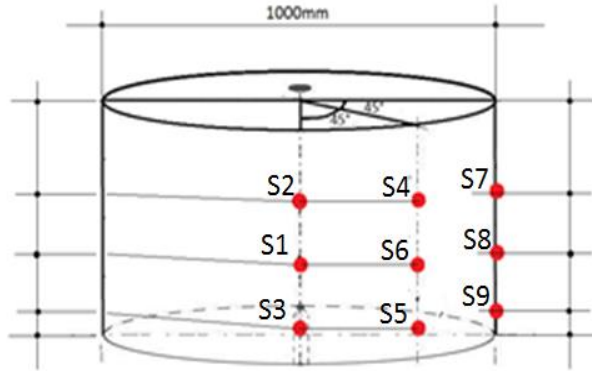
Deneyisel model



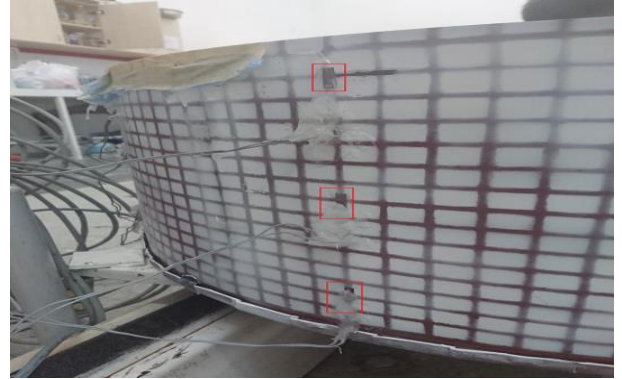
Deneyisel model genel görünüm

Şekil 1. Deneyisel modelin genel görünümü

Silo tipi bir yapıda su seviyesine bağlı dalga /yapı etkileşimi için en olumsuz durumların ortaya konulabilmesi için oluşturulan deneysel analizde sarsma tablası kullanılarak farklı su seviyeleri için dalga kuvveti üretilmiştir. Silo cidarında meydana gelen deformasyonların sayısal model ile karşılaştırılabilmesi ve yapısal davranışın ölçeklendirilebilmesi için deneysel model dış cephesi boyanarak sonlu parçalara ayrılmıştır. Sayısal modelin kalibrasyonunun sağlanabilmesi için ayrıca model dış yüzeyine gerinim ölçer pullar yapıştırılarak, etkiyen dalga yükü altında silo cidarındaki şekil değiştirmeler tespit edilmiştir. Şekil 2'de gerinim ölçer pullarının yerleşim düzeni verilmiştir.



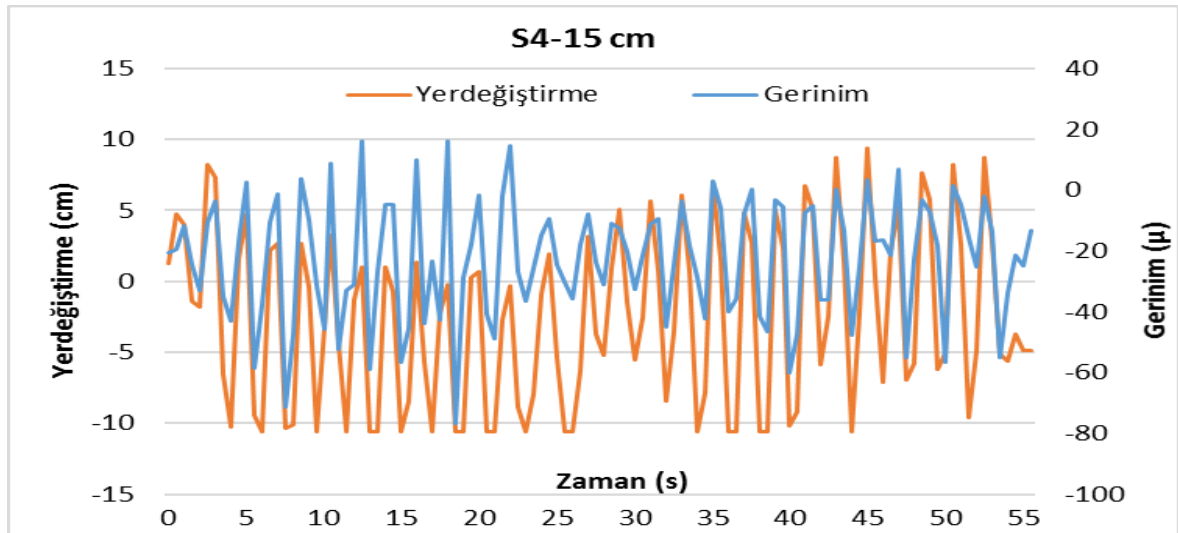
Deneysel model gerinim pulu yerleşim düzeni



Silo cidarındaki tek yönlü gerinim pulları

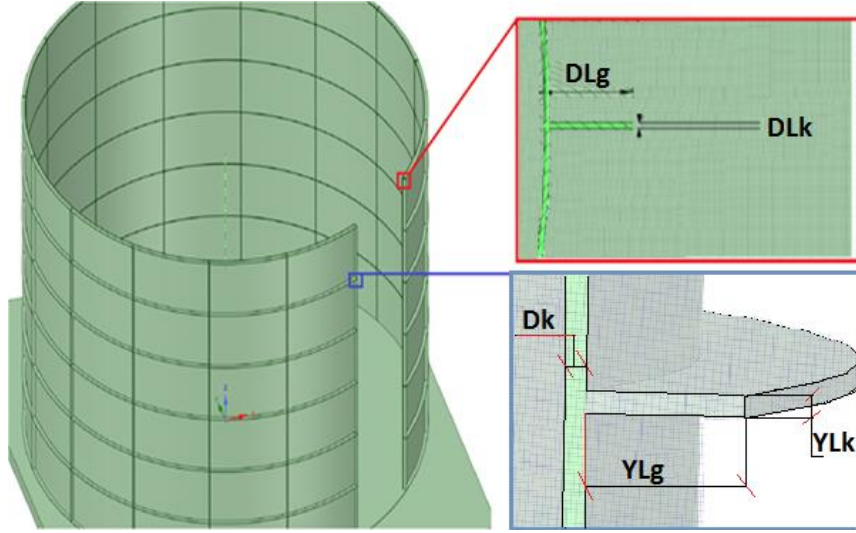
Şekil 2. Gerinim pullarının yerleşim düzeni

Dalga kuvveti altında silo cidarındaki şekil değiştirmeyi temsil etmek için dokuz farklı gerinim ölçer 3 farklı eksen üzerinde maksimum şekil değiştirmenin beklendiği yön ve durum dikkate alınarak yerleştirilmiştir. Deneyel analizde dalga kuvveti yerdeğiştirme kontrollü olarak manuel olarak uygulanmıştır. Sarsma tablasına yerleştirilen deplasman okuyucular kullanılarak yatay yerdeğiştirmeler belirlenen zaman aralığı için tespit edilmiş olup, bu veriler üzerinden yükleme protokolü ivme değerleri elde edilmiştir. Bu kapsamda sarsma protokolleri farklı su seviyeleri için, düşük ve yüksek frekanslı hareket meydana getirecek şekilde oluşturulmuştur. Yükleme protokollerinde su seviyeleri sırasıyla yaklaşık %15 lik artışla ile 50mm, 100mm, 150mm, 200mm ve 250mm olarak belirlenmiş ve dalga yükü elde edilmiştir. Yapılan dalga analizi sonucunda farklı su seviyeleri için silo cidarında meydana gelen şekil değiştirmeler verilmiştir. Grafikler sarsma tablası yerdeğiştirme (deplasman) değerine karşılık silo cidarındaki şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Şekil 3'te yapılan ölçümler içinde x eksenin de yer alan maksimum şekil değiştirmenin tespit edildiği S4 No'lu gerinim pulu için ölçülen değerler verilmiştir. Burada 15 cm'lik değerler su seviyesini belirtmektedir.



Şekil 3. X eksenli yerdeğiştirme gerinim grafiği

Çalışmanın sayısal analizleri Ansys Work Bench sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmıştır. Programda deneysel model, kullanılarak oluşturulan sayısal algoritmanın doğruluğu teyit edilmiştir. Deneysel analiz sonuçları kullanılarak doğruluğu ispatlanmış matematik model Şekil 4’te tanımlanan boyutsal parametreler için çözümlenmiştir. Çalışmada yatay ve düşey levhaların yapısal davranışa etkisinin irdelenmesi için kullanılan tüm boyutsal parametreler verilmiştir.



Şekil 4. Rijitleştirme levhalarının boyutsal parametreleri [14]

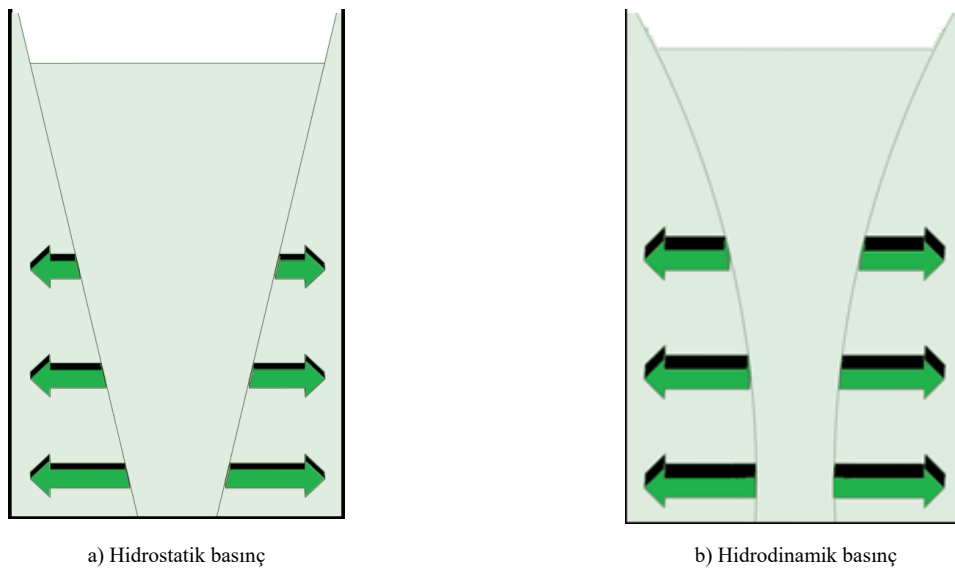
Çalkantı etkisi altında meydana gelen dalga kuvvetinin silo cidarında daha güvenli bir şekilde sönmülmesini sağlamak amacı ile kullanılan rijitleştirme levhalarının yapısal davranışa etkisini inceleyebilmek için yerleşim düzeni bakımından farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan tüm sayısal modellerde silo cidarı 20mm alınmış ve bu değer sabit tutulmuştur. Rijitleştirme halkaları için kullanılan levha genişlikleri hem düşey hem de yatay levhalar için $DLg/ YLg=150\text{mm}$, levha kalınlıkları ise $DLk/YLk=20\text{mm}$ olarak modellenmiştir (DL: Düşey levha, YL: Yatay levha, D: Duvar).

Düşey levha ve yatay levhaların davranışa farklılıkları ortaya koyabilmek için yerleşim şekilleri şu şekilde düzenlenmiştir. Yatay levha yerleşim şekli sabit 12m yükseklik için 2m ve 1m arkalıkla 6 ve 12 adet kullanılmıştır. Düşey levha yerleşim düzeni ise dairesel planda 8 ve 16 adet kullanılarak tasarlanmıştır. Farklı çap durumu, sabit yükseklik için levha yerleşim sayıları kendi içlerinde kombinasyon oluşturularak toplamda 12 model oluşturulmuştur. Tablo 1’de çalışmada kullanılan sayısal modellerin boyutsal parametreleri ve isimlendirmeleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Model parametreleri

Model No.	Düşey Levha Sayısı(Adet)	Yatay Levha Sayısı(Adet)	DLg (mm)	YLg (mm)	Su Seviyesi (mm)	YLk (mm)	DLk (mm)	Dk (mm)	Çap (mm)	Yükseklik (mm)
S12	-	6	-	150	7000	20	20	20	12500	12000
S13	8	6	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S15	8	12	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S16	16	12	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S22	-	6	-	150	7000	20	20	20	17500	12000
S23	8	6	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S25	8	12	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S26	16	12	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S32	-	6	-	150	7000	20	20	20	25000	12000
S33	8	6	150	150	7000	20	20	20	25000	12000
S35	8	12	150	150	7000	20	20	20	25000	12000
S36	16	12	150	150	7000	20	20	20	25000	12000

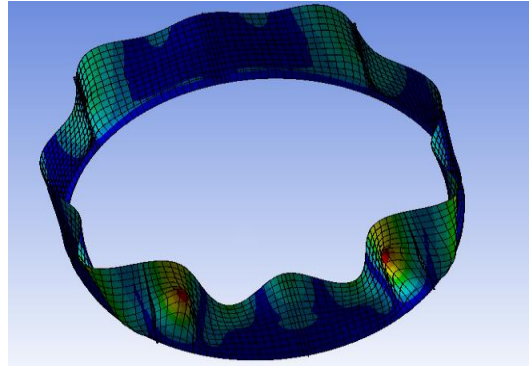
Sayısal analizlerde %60 doluluk için sismik yük altında hesaplanan dalga kuvveti, statik olarak silo cidarına uygulanmıştır. Yük değerlerinin uygulama şeklinde Hidrostatik ve hidrodinamik basınç etkisi altındaki silindirik çelik su tanklarının tasarımın teorisi dikkate alınmıştır. Hidrostatik su basıncı, sıvı yüksekliğince artarak değişen basınç gerilmesi olarak etkir ve Şekil 2’de görüldüğü üzere sıvının üstünden herhangi bir noktaya olan yüksekliğe ve yoğunluğa bağlı olarak artan bir dağılımda etkimektedir. Ancak taban hareketine bağlı olan hidrodinamik basınç etkisi ise eğrisel bir dağılım ile silo yüzeyine etkimektedir.



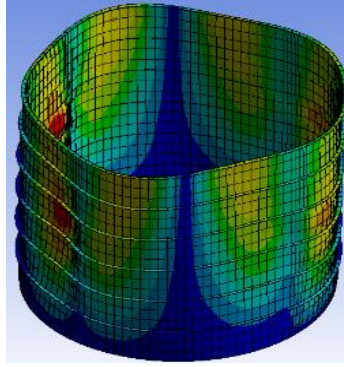
Şekil 5. Dinamik ve statik su basıncının etkimesi a) hidrostatik basınç durumu b) hidrodinamik basınç durumu

III.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

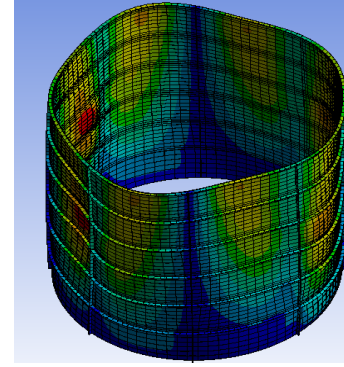
Dalga yükü etkisi altındaki silo tipi su tankının yapısal davranışının incelendiği bu çalışmada silo cidarındaki rijitliği artırmak ve deformasyonları kontrol altına almak için düşey ve yatay yönde rijitleştirme levhaları kullanılmıştır. Rijitleştirme levhaların yerleşim şekli ve sayısına göre yapısal davranışların irdelenebilmesi için, tüm modellere ait deforme olmuş durumlar, yükler, cidardaki yerdeğiştirmeler ve cidar gerilme değerleri hesaplanmıştır. Tüm modeller literatürde “M” tipi davranış olarak geçen davranışa eğilim göstermektedir. Şekil 6’da ifade edilen davranış; silo cidarında meydana gelen şekil değiştirmenin “M” harfine benzemesi sebebiyle kullanılmaktadır. Bu kapsamda çalışmada kullanılan modellerden 12,5m çap, 12m yüksekliğe sahip S1 serisine ait deforme olmuş durumlarına ait görseller Şekil 7’de verilmiştir.



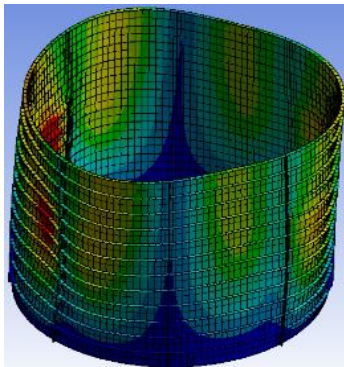
Şekil 6. M tipi deformasyon görünümü



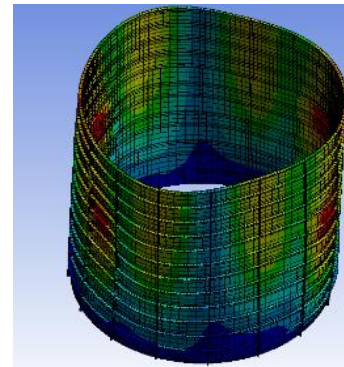
S12



S13



S15



S16

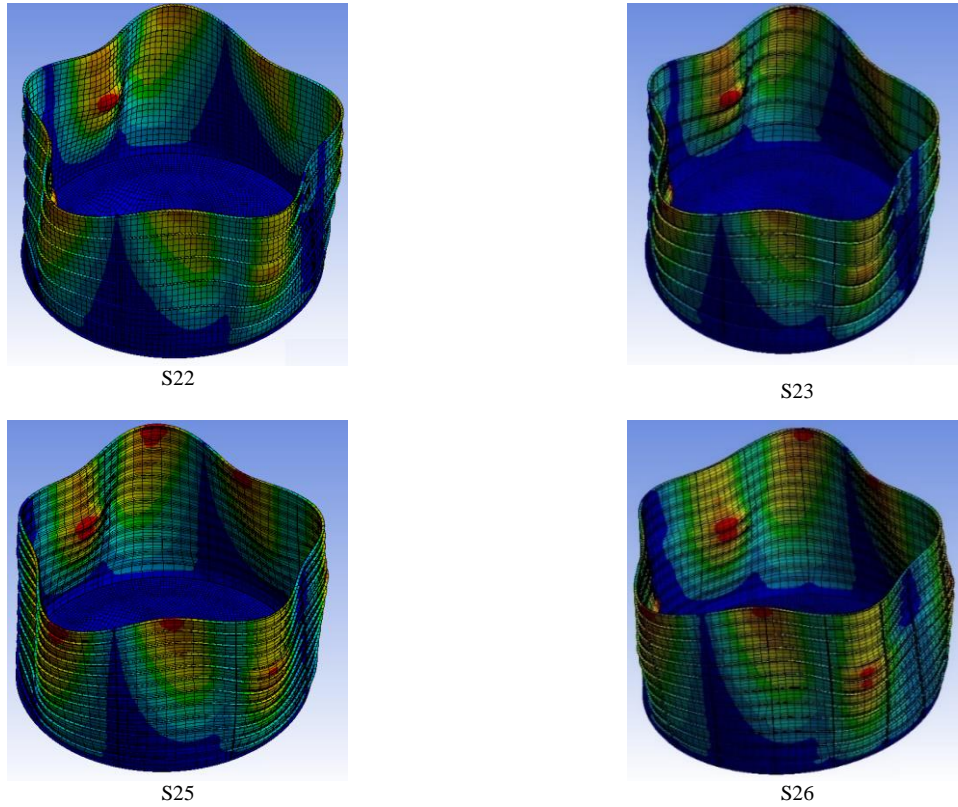
Şekil 7. S1 serisine ait deformasyon durumları

Deforme olmuş durumlar kıyaslandığında kombinasyonlar arasındaki rijitlik farkı deformasyonlar aracılığı ile açıkça görülmektedir. Bu durum sayısal modeller için hesaplanan doğal titreşim periyotları değerlerince de teyit edilmektedir. Tablo2’de tüm modeller için yapılan modal analiz sonucunda elde edilen doğal titreşim periyotlarına ait ilk üç durum örneklendirilmiştir.

Tablo 2. Doğal titreşim periyotları (sn)

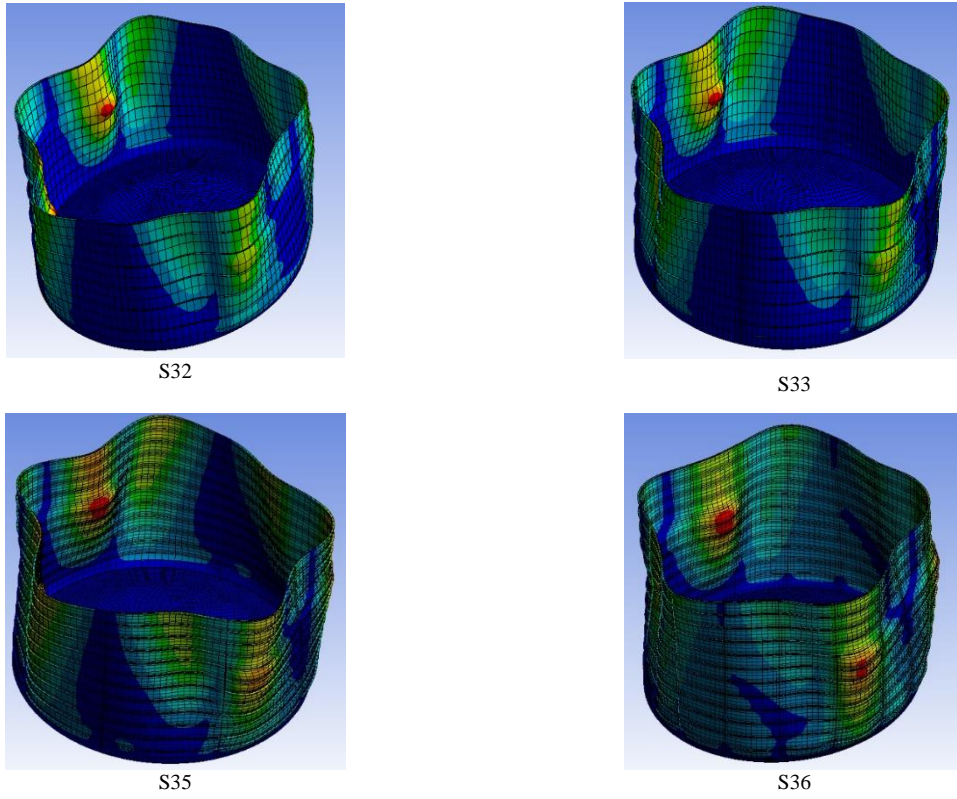
S12	S13	S15	S16
0,105982	0,102467	0,088472	0,084459
0,105696	0,100576	0,086222	0,084331
0,089638	0,088464	0,085778	0,082912

Çalışmada ikinci model olan 17,5m çap 12m yüksekliğindeki S2 serisi deforme olmuş duruma ait görünüm Şekil 8’te verilmiştir.



Şekil 8. S2 serisi deformasyon görüntüleri

S2 serisine ait durumlar S1 serisi ile kıyaslandığında çap artışının bir sonucu olarak deformasyon durumlarının arttığı gözlemlenmiştir. S2 serisinde S1 serisine kıyasla “M” tipi davranış daha net görülebilmektedir. Özellikle S22 modelinde, düşey rijitleştiricilerin olmayışı bu davranışı engelleyememektedir. En fazla levha sayısının olduğu kombinasyona sahip olan S26 modeli ile S16 modelinin kıyaslanması çap artışıdaki farkı öne çıkarmaktadır. Çalışmanın çapça en büyük sayısal modeli olan S3 serisinde çap değeri 25 m, yükseklik 12 m’dir. Bu durum için elde edilen deformasyon haline ait görüntüler Şekil 9’te verilmiştir.

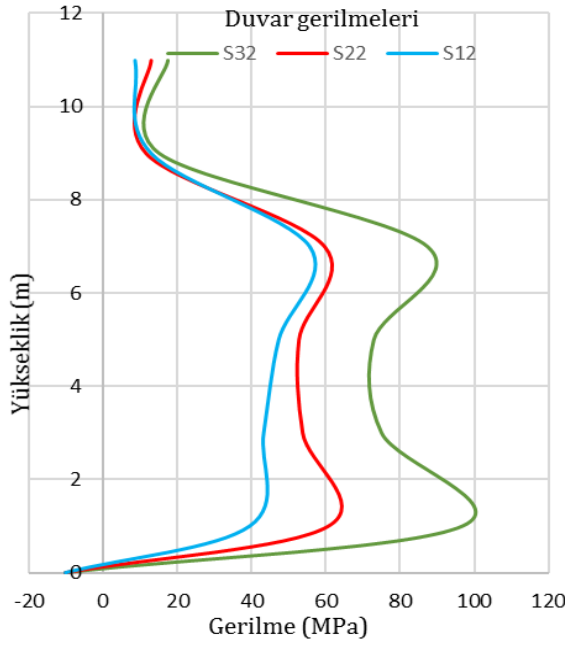


Şekil 9. S3 serisi deformasyon görünümleri

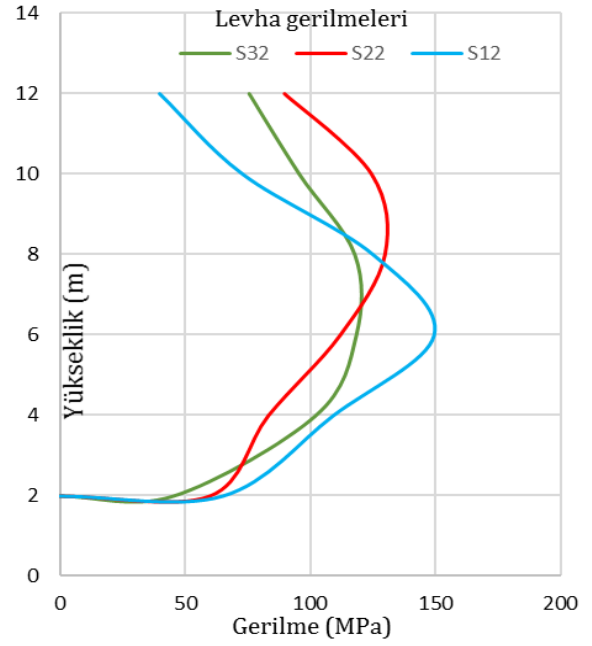
Şekil incelendiğinde çap büyüdükçe sadece yatay durumun tek başına yeterli olmadığı, yatay ve düşeyin birlikte kombine edilmesinin silo cidarındaki deformasyonların sönümlenmesinde daha etkin olacağı görülmektedir.

A. Sayısal Modellerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

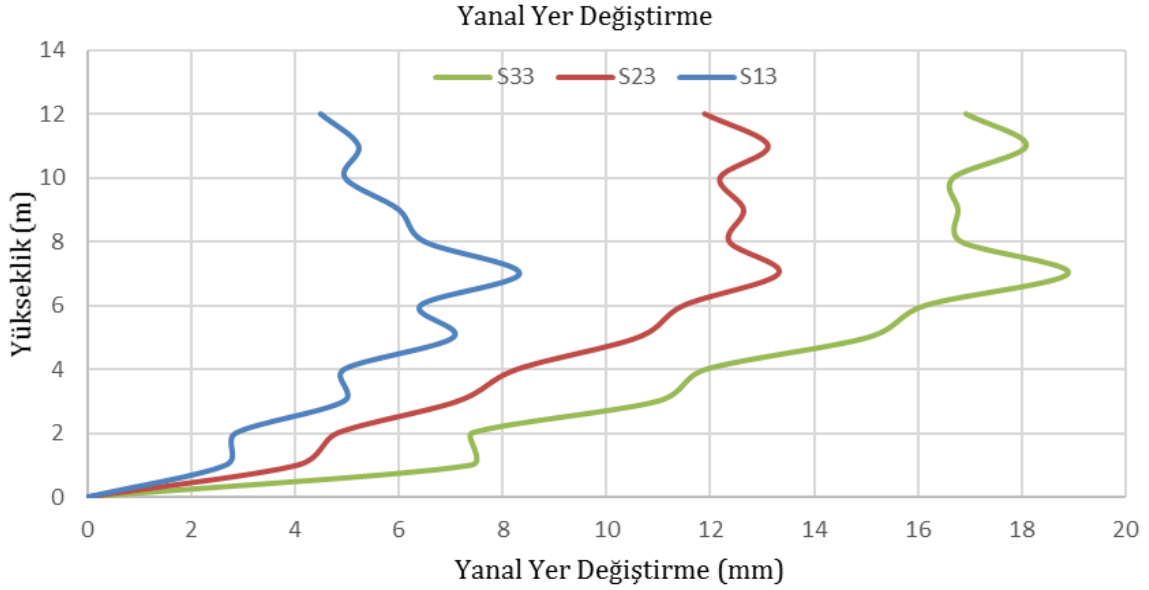
Tüm çap durumları için benzer kombinasyonları temsil eden modeller gerilme ve deformasyon durumlarınca şekiller ile gösterilmiştir. Şekil 10'da tüm çap durumları için 2 numaralı kombinasyon olan sadece yatay levha kullanımlarının olduğu modeller sunulmuştur.



a) 2 no'lu kombinasyon için duvar gerilmeleri



b) 2 no'lu kombinasyon için levha gerilmeleri



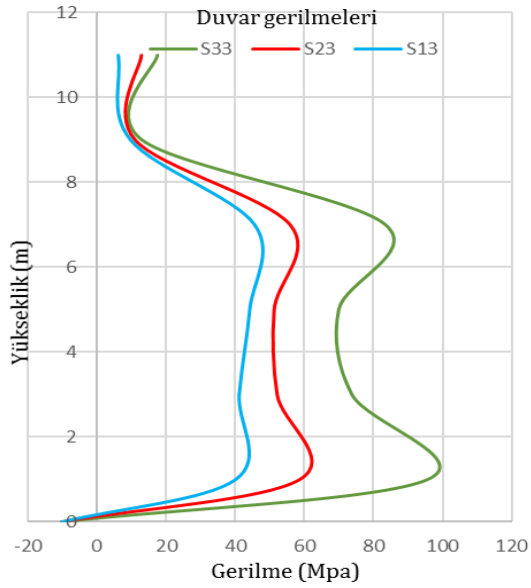
c) 2 no'lu kombinasyon için yanal yer değiştirme değerleri

Şekil 10. S12, S22, S32 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) yanal yer değiştirme değerleri

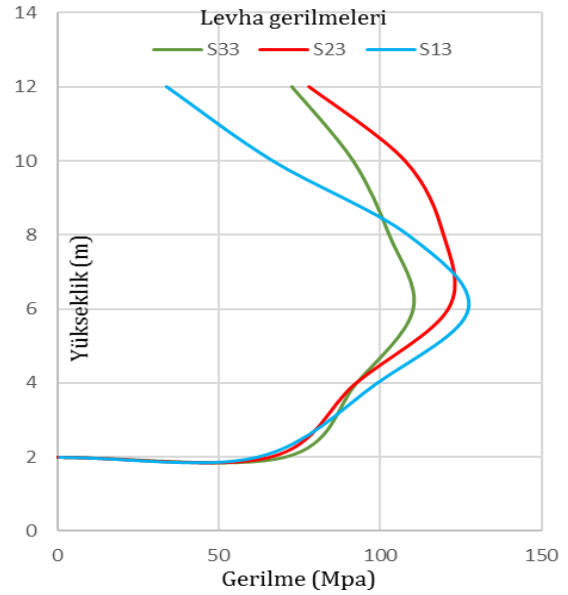
Elde edilen deformasyon değerleri incelendiğinde en az deformasyon beklendiği üzere en küçük çap olan S12, takiben S22 ve S32 modelinde görülmektedir. Deformasyonların silo yüksekliği üzerine dağılımları incelendiğinde silo çapındaki artış silo cidarı kaynaklı kazanılan atalet momentindeki azalmaya sebep olması ile sadece yatay kuşak kullanımının deformasyon sönümünü tam olarak karşılayamadığı deformasyon grafiklerinin zikzaklı bir dağılım göstermesinden anlaşılabilir. Grafiklerdeki zikzak, kullanılan yatay kuşağın kullanıldığı bölümlerde sağladığı rijitlik sebebi ile oluşmaktadır. Aynı durum gerilme dağılımlarının silo cidarındaki sonuçlarına da yansımıştır, ancak levhaların üzerindeki gerilme değerleri dikkate alındığında levhaların gerilme değerlerinin çaptan bağımsız olduğu görülmektedir. Bu durum levha üzerindeki gerilmenin

sahip olduğu atalet değerleri ile orantılı olarak karşılanması ile yorumlanabilir, yani tüm modellerde levha boyutları aynı kullanılmasına rağmen çap değerleri değişmiştir. Bu durum tüm modellerde çap boyutlarında artış olmasına rağmen levha boyutlarını yani bu boyutlara karşılık elde edilen ataletlerin aynı olması sebebi ile açıklanabilir.

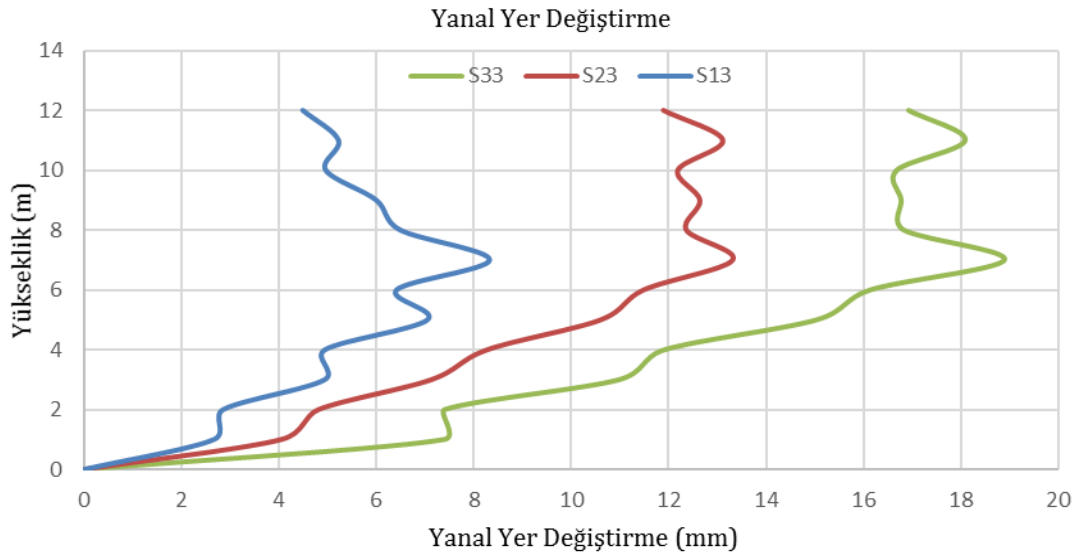
3 numaralı kombinasyona sahip düşey ve yatay levhaların kullanılmaya başlandığı sayısal modeller olan S13, S23 ve S33 modelleri için dalga yükü yapı etkileşimini değerlendirmek amacı ile gerilme ve deformasyon değerleri Şekil 11’de gösterilmiştir. Düşey ve yatay levhaların kullanımının sadece yatay levhaların kullanıldığı 2 numaralı kombinasyona göre yanall yer değıştirmeleri tutmada daha başarılı olduğu görülmüştür. Çap boyutunun yükselmesi ile yanall yer değıştirme ve duvar gerilmelerinde de artışlar gözlemlenmiştir.



a) 3 no’lu kombinasyon için duvar gerilmeleri



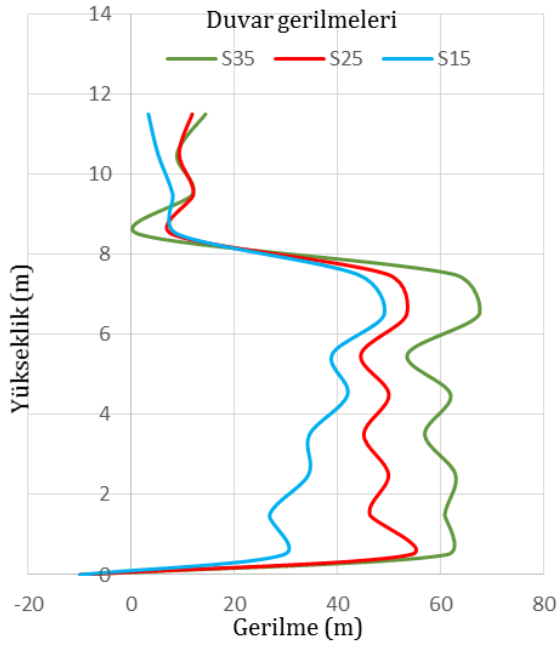
b) 3 no’lu kombinasyon için levha gerilmeleri



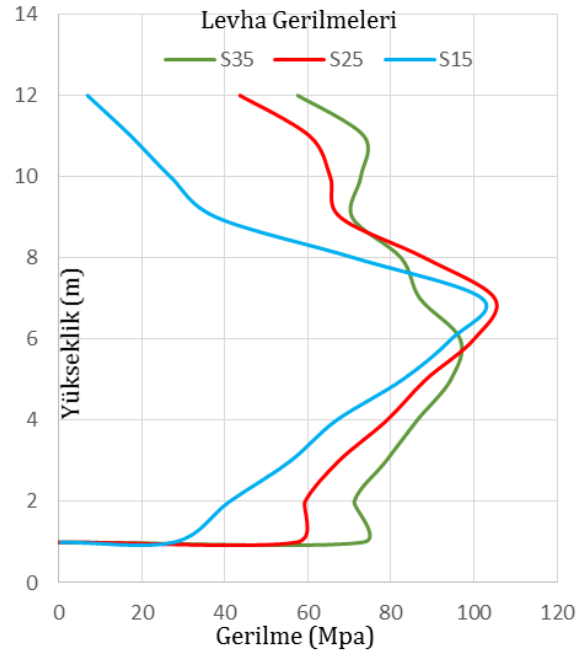
c) 3 no’lu kombinasyon için yanall yer değıştirme değerleri

Şekil 11. S13, S23, S33 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) yanall yer değıştirme değerleri

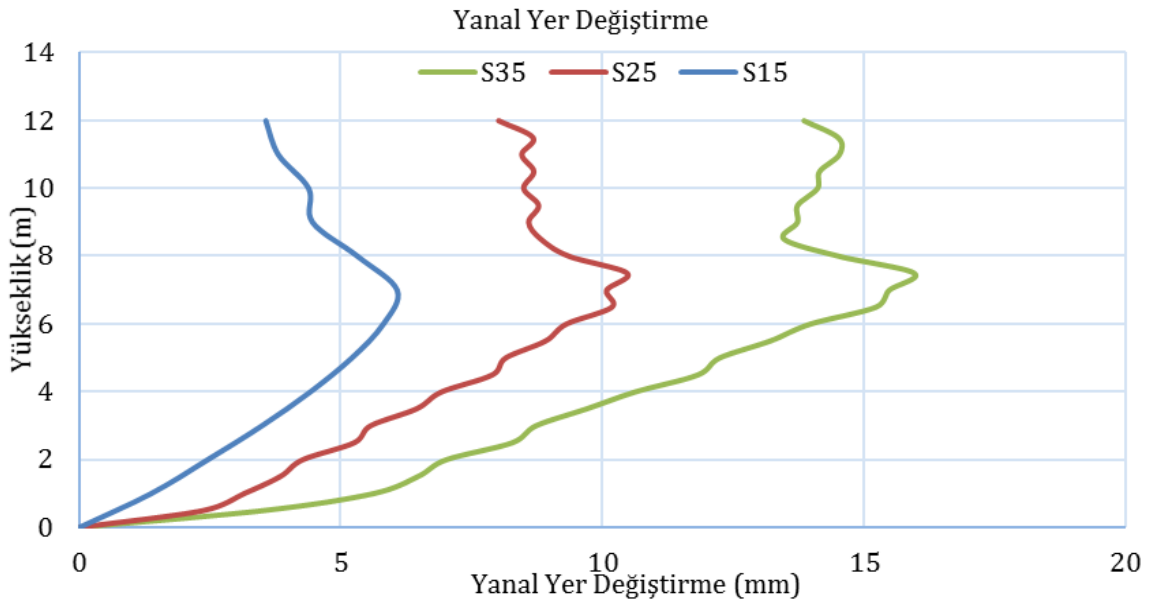
Şekil 12'de düşey ve yatay levhaların birlikte kullanıldığı 5 numaralı kombinasyona ait grafikler verilmiştir. Silo cidarı, yüksekliğince meydana gelen yanıl yer değıştirmelere ait grafikler incelendiğinde; sonuçların silo çapı değışimine göre farklılaştığı, çap büyüdükçe yapının yanıl yer değıştirme kabiliyetinin arttığı ve grafiklerin birbirlerinden ayrıştığıdır. Ancak bir önceki durumda olduğu gibi bu durumda da levha üzerinde meydana gelen gerilmeler çap değışmesi rağmen özdeş ve aynı çizgidedir. Buradaki sebep silo çap değışmelerinin değışmesine rağmen levha boyutlarının sabit kalması ile açıklanabilir. Şekil 13'de düşey ve yatay levhaların birlikte kullanıldığı 6 numaralı kombinasyon için elde edilen grafikler verilmiştir.



a) 5 no'lu kombinasyon için duvar gerilmeleri

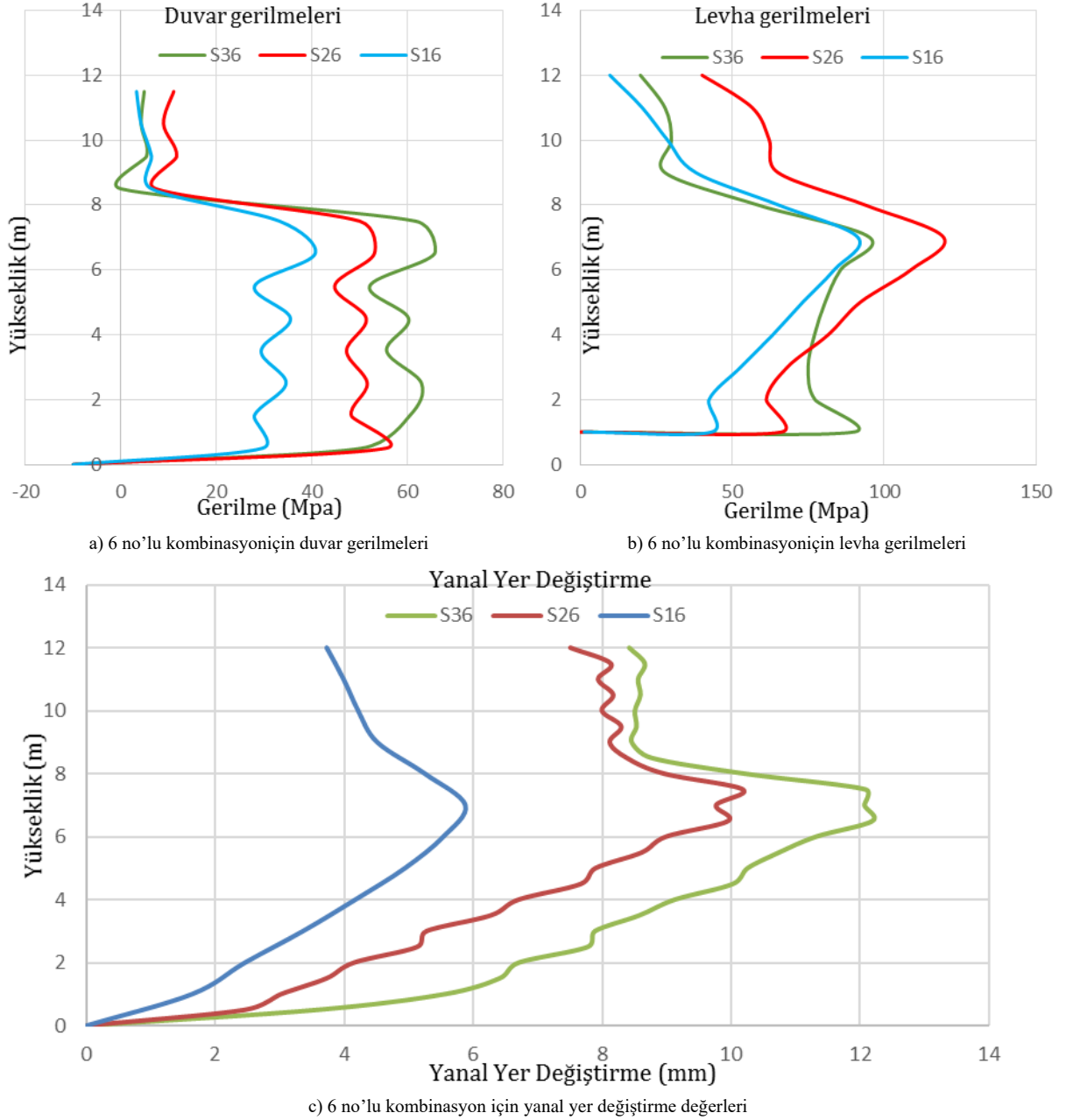


b) 5 no'lu kombinasyon için levha gerilmeleri



c) 5 no'lu kombinasyon için yanıl yer değıştirme değışleri

Şekil 12. S15, S25, S35 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) yanıl yer değıştirme değışleri



Şekil 13. S16, S26, S36 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) yanal yer değiştirme değerleri

Yatay ve düşey levhaların birlikte kullanıldığı en çok levha miktarına sahip 6 numaralı kombinasyona ait deformasyon verileri incelendiğinde yine en küçük çaplı durum olan S1 serisinin en az yer değiştirme değerini alarak S26 ve S36 dan ayrıştığı görülmüştür. S26 ve S36'nın birbirleri ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durumdaki temel sebep, çap büyümesine karşın kullanılan levhaların boyutsal parametrelerinin aynı kalması olarak açıklanabilir. Bu sebeple düşey levha ve yatay levhalar kullanılarak rijitleştirilen silo cidarlarında çap değerlerinin artışı ile orantılı olarak levha boyutlarının da büyütülmesi gerektiği görülmektedir. Gerilme dağılımları için elde edilen sonuçlar incelendiğinde her iki durumda da bütün modellerde olduğu gibi dalga ile etkileşimde olan duvar çeperleri aynı çizgide dağılım göstermiş ve çapça en küçük olanlar minimum değerleri almıştır. Levha üzerindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, çap büyüdükçe levha üzerindeki gerilmelerin zikzaklı bir çizgide değiştiği ve lineer sönümlemenin kaybolduğu görülmüştür.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yatay ve düşey levhaların yapısal davranışa etkisinin incelendiği bu çalışmada, önceki çalışmalarımızdaki analiz sonuçları göstermiştir ki sadece düşey levhaların kullanıldığı durumda silo çeperi yapısal davranışı literatürde M tipi şekil değiştirme ile benzeşen, verimsiz sonuçlar vermiştir. Bu sebeple sadece düşey levhaların kullanıldığı duruma ait sonuçlara çalışmada yer verilmemiştir. Elde edilen sonuçlara göre çalışma kapsamında sadece yatay ile yatay ve düşeyin birlikte kullanıldığı kombinasyonlar için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir ve bunlara ait grafikler yorumlanmıştır.

Silo çapı farklılaşan yüksekliği sabit tutulan, aynı su seviyesi ve sabit dalga boyu için farklı kombinasyonların kullanıldığı modellerin sayısal analizlerin yapıldığı bu çalışmada, sistem düşey ve yatay yönde rijitleştirme levhaları ile güçlendirilmiştir. Sistem rijitliğini artırmak için kullanılan rijitleştirme levhalarının davranışa katkısının incelenmesi için düşey ve yatay elemanların(levhaların) yerleşim şekli ve sayısı değişken kabul edilerek 4 farklı kombinasyon için üç farklı silo çapı için 12 sayısal model ile analizler yapılmış şu sonuçlar elde edilmiştir;

Gerilme dağılımları bakımından değerlendirildiğinde yüksek sayıda yatay ve düşey levhanın kombine edildiği modeller genel olarak daha az gerilmeye maruz kalmıştır. Yatay ve düşey levhaların beraber kullanılması durumlarında deformasyon ve gerilme değerlerinin sadece yatay kullanılan durumlardan çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yatay ve düşey levhaların S13 modeli ile başlayarak birlikte kullanılmaya başlandığı modeller içinde 5 ve 6 no'lu kombinasyonlar üç farklı çapa ait modellerin tümünde 3 no'lu kombinasyon karşılaştırıldığında belirgin bir fark görülmektedir. Bu durum yatay ve düşey levhaların sıklaştığı durumların etkinliğini göstermektedir. Levha sayısındaki artış deformasyonu belirgin bir şekilde kontrol altına almış ve gerilmeler için olumlu bir katkı sağlamıştır. Levha miktarlarındaki artışın sonuçları aynı şekilde 17.5m ve 25m çaplarına sahip modellerin grafiklerinde de karşılaşılmıştır. Bu durumda yatay levhalı sistemlerin düşey levhalar ile birlikte kullanıldığı takdirde daha ekonomik çözümler üretilebileceği düşünülmektedir.

Farklı silo çaplarındaki eşdeğer kombinasyonların karşılaştırılması irdelenerek küçük çaptaki modellerin büyük çaptaki versiyonlarına kıyasla daha rijit kaldıkları ve deformasyonlarının sınırlandırıldığı görülmüştür. Levha boyutlarının silo çapları değişmesine rağmen modeller arasında farklılaşmamasından kaynaklı olarak deformasyon grafiklerindeki bu durum daha net görülebilmektedir. Kullanılan levha genişliğinin ve cidarının hizmet ettiği levha çapına göre göreceli olarak küçük kaldığı, başka bir ifade ile ataletçe yetersiz kaldığı sonucu çıkarılabilir.

Çap küçüldükçe silo cidarındaki deformasyonlar daha lineer bir çizgide hareket etmekte, çap artışı görüldükçe silo cidarındaki deformasyonların zikzaklı bir dağılım gösterdiği grafiklerde görülmektedir. Silo cidarındaki zikzaklı dağılımın önüne geçebilmek için levha genişliğinin çap değişimine göre hesaplanan uygun bir orantıda artırılması önerilmektedir. Bundan dolayıdır ki eğer bu tip düşey ve yatay levhalar ile sistem güçlendirilmesi yapılmak istenirse çap değerindeki artış ile orantılı olarak levha geometrik boyutlarında da artışa gidilmesi gerekmektedir. Bu durum göz önüne alındığında silo çapının değiştiği durumlarda rijitleştirme levhalarının boyutlarında da bir değişikliğe gidilip silo boyutlarına göre optimize edilmesi ekonomi ve levha etkinliği yönünden daha olumlu sonuçlar alınmasına olanak sağlayacaktır. Ancak levhaların beraber kullanıldığı durumlarda sağlamış olduğu fayda levha boyutlarının yanı sıra levha sayısı ile de değiştirilebildiği için levha sayısı ve boyutlarındaki değişimlerin birlikte yapılması durumunun daha avantajlı olacağı düşünülmektedir.

Yapılan bu çalışmada su/yapı etkileşimi statik olarak analiz edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, etkinin dinamik olarak analiz edilmesinin yapı davranışının yapı güvenliği açısından değerlendirilmesi için daha verimli sonuçların elde edileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Özel, K.(2007). Çelik Hububat Silolarının Tasarım Esasları, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya Selçuk Üniversitesi.
- [2] Dogangun, A., Karaca, Z., Durmus, A. & Sezen, H.(2009). Cause Of Damage And Failures İn Silo Structures. *Journal Of Performance Of Constructed Facilities*, 23(2), 65-71.
- [3] Kuczyńska, N., Wójcik, M. & Tejchman, J.(2015). Effect Of Bulk Solid On Strength Of Cylindrical Corrugated Silos During Filling.*Journal Of Constructional Steel Research*, 115, 1-17.
- [4] Akyildiz, H., Ünal, N.E. & Taylan, B.(2012). Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 6089-6112
- [5] Brar, G. S. & Singh, S. (2014). An Experimental and CFD Analysis of Sloshing in a Tanker. *Procedia Technology – ICIAME*.
- [6] Akyildiz, H. & Unal, E. (2005). Experimental Investigation of Pressure Distribution on a Rectangular Tank due to Liquid Sloshing. *Ocean Engineering*, 32(11-12): 1503-1516.
- [7] Sanapala, V., M., R., Velusamy, K. & Patnaik, B. (2018). Numerical Simulation of Parametric Liquid Sloshing in a Horizontally Baffled Rectangular Container. *Journal of Fluids and Structures*, pp. 229-250.
- [8] Akyildiz, H. & Unal, N. E. (2006). Sloshing in a Three-Dimensional Rectangular Tank: Numerical simulation and experimental validation. *Ocean Engineering*, 33(16): 2135-2149.
- [9] Armenio, V. & La Rocca, M. (1996). On the Analysis of Sloshing of Water in Rectangular Containers: Numerical Study and Experimental Validation. *Ocean Engineering*, 23(8): 705-739.
- [10] Altun, H. A. & Gedikli, A. (2013). Sesimic Analysis of Steel Liquid Storage Tanks by API-650” (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Structural Engineering Programme, Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology)
- [11] Panigrahy, P., Saha, U. & Maity, D. (2009). Experimental Studies on Sloshing Behavior due to Horizontal Movement of Liquids in Baffled Tanks. *Ocean Engineering*, pp. 213-222.
- [12] Zang, Q., Fang, H., Liu, J. & Lin, G.(2019). Boundary element model for investigation of the effects of various porous baffles on liquid sloshing in the two dimensional rectangular tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 484-500.
- [13] Efe, M. E., Çelik, İ. D., Kocaman, T. B., Arslan, K. Y. (2020). Rijitleştirme Levhalı Sıvı Depolama Tankının Yapısal Davranışının Dalga Yüğü Altında İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2), 296-303.
- [14] Ansys Workbench, ANSYS, Inc.
- [15] Efe, M. E. (2020). Hidrodinamik Etki Altındaki Silo Tipi Çelik Yapıların Sıvı Çalkantısına Bağlı Yapısal Davranışın İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü/ İnşaat Mühendisliği, Süleyman Demirel Üniversitesi.

Araştırma Makalesi - Research Article

Lucas Sayılarının Max Matrislerde Bir Uygulaması¹

Bahar Akyüz^{2*}, Mustafa Bahşi³

Geliş / Received: 16/05/2020

Revize / Revised: 22/09/2020

Kabul / Accepted: 20/10/2020

ÖZ

Bu çalışmada, L_n ; n . Lucas sayısını göstermek üzere $C = [L_{k+\max(i,j)-1}]_{i,j=1}^n$ şeklinde bir Max matrisi tanımladık ve bu matrisin determinant, ters ve norm gibi bazı özelliklerini inceledik. İlk olarak, genel Max matrisi için bilinen sonuçları kullanarak C matrisinin determinantını ve tersini verdik. Daha sonra, C matrisinin Öklid normu için bir eşitlik ve spektral normu için bir üst sınır oluşturduk. Son olarak, C matrisinin Hadamard tersinin determinantını ve tersini hesapladık.

Anahtar Kelimeler- Max Matris, Ters Matris, Matris Normu

¹Bu çalışma, Bahar Akyüz (2017) tarafından hazırlanan Yüksek Lisans Tezinin bir parçasıdır.

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: akyuz.bhr@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7079-5820>)

Sarayönü Anadolu İmam Hatip Lisesi, Konya-Türkiye

³İletişim: mhvbahsi@yahoo.com (<https://orcid.org/0000-0002-6356-6592>)

Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Aksaray- Türkiye

An Application of Lucas Numbers in Max Matrices

ABSTRACT

In this study, we have defined a Max matrix as $C = [L_{k+\max(i,j)-1}]_{i,j=1}^n$ and have examined its some properties, such as determinant, inverse and norm, where L_n denotes the n th Lucas number. First, we have given the determinant and inverse of matrix C by using known results for general Max matrix. Then we have established equality for Euclidean norm and an upper bound for the spectral norm of matrix C . Finally, we have computed the determinant and inverse of Hadamard inverse of matrix C .

Keywords- *Max Matrix, Inverse Matrix, Matrix Norm*

I.GİRİŞ

Özel yapılı matrislerden ikisi; elemanları maksimum ve minimum kavramlarına bağlı olarak tanımlanan Max ve Min matrislerdir. Literatürde, Max ve Min matris çeşitlerine veya özel hallerine adına Max ve Min matris denilirse de farklı zamanlarda rastlanılmaktadır. Bu çalışmalarla ilgili detaylı bilgi, Max ve Min matrisleri aşağıdaki gibi tanımlayan Mattila ve Haukkanen [1] tarafından verilmiştir.

Tanım 1.1. $T = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ kümesi sonlu reel sayılar kümesi ve $z_1 \leq z_2 \leq \dots \leq z_n$ olmak üzere; elemanları $\min(z_i, z_j)_{i,j=1}^n$ şeklinde tanımlı $(T)_{\min}$ matrisine ve elemanları $\max(z_i, z_j)_{i,j=1}^n$ şeklinde tanımlı $(T)_{\max}$ matrisine sırasıyla Min matris ve Max matris denir [1]. Bu matrisler açık olarak,

$$(T)_{\min} = \begin{bmatrix} z_1 & z_1 & z_1 & \dots & z_1 \\ z_1 & z_2 & z_2 & \dots & z_2 \\ z_1 & z_2 & z_3 & \dots & z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1 & z_2 & z_3 & \dots & z_n \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad (T)_{\max} = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 & \dots & z_n \\ z_2 & z_2 & z_3 & \dots & z_n \\ z_3 & z_3 & z_3 & \dots & z_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_n & z_n & z_n & \dots & z_n \end{bmatrix}$$

şeklinde yazılır [1].

Mattila ve Haukkanen [1], bu $(T)_{\max}$ ve $(T)_{\min}$ matrislerini;

$$(T)_{\max} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 - z_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 - z_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ve

$$(T)_{\min} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 - z_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & z_2 - z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

şeklinde çarpanlarına ayırmışlardır. Ayrıca, yine aynı çalışmada yazarlar bu matrislerin determinantlarını

$$\det(T)_{\max} = z_n \prod_{i=1}^{n-1} (z_i - z_{i+1}) \quad \text{ve} \quad \det(T)_{\min} = z_1 \prod_{i=1}^{n-1} (z_{i+1} - z_i) \quad (3)$$

şeklinde ve uygun şartlar altında $(T)_{\max}$ ve $(T)_{\min}$ matrislerinin terslerinin (i, j) . elemanlarını sırasıyla

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0, & |i-j| > 1, \\ \frac{1}{z_1 - z_2}, & i = j = 1, \\ \frac{1}{z_{i-1} - z_i} + \frac{1}{z_i - z_{i+1}}, & 1 < i = j < n, \\ \frac{1}{|z_i - z_j|}, & |i-j| = 1, \\ \frac{1}{z_{n-1} - z_n} + \frac{1}{z_n}, & i = j = n \end{array} \right. \quad (4)$$

ve

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0, & |i-j| > 1, \\ \frac{z_2}{z_1(z_2 - z_1)}, & i = j = 1, \\ \frac{1}{z_i - z_{i-1}} + \frac{1}{z_{i+1} - z_i}, & 1 < i = j < n, \\ \frac{1}{|z_i - z_j|}, & |i-j| = 1, \\ \frac{1}{z_n - z_{n-1}}, & i = j = n \end{array} \right. \quad (5)$$

olarak elde etmişlerdir.

Başı ve Solak [2], $A_k = [k + \min(i, j) - 1]_{i,j=1}^n$ ve $B_k = [k + \max(i, j) - 1]_{i,j=1}^n$ matrislerini incelemişler ve bu matrislerin karakteristik polinomları ile genelleştirilmiş Fibonacci sayıları arasındaki ilişkileri vermişlerdir. Petroudi ve Pirouz [3], elemanları Fibonacci sayılarından oluşan $F = [F_{\min(i,j)+1}]_{i,j=1}^n$ matrisinin determinantını, tersini incelemişler ve spektral normu için alt ve üst sınırlar vermişlerdir. Akyüz [4] yüksek lisans tezinde, Petroudi ve Pirouz [3] tarafından incelenen bu F matrisini $A = [F_{k+\max(i,j)-1}]_{i,j=1}^n$, $B = [F_{k+\min(i,j)-1}]_{i,j=1}^n$, $C = [L_{k+\max(i,j)-1}]_{i,j=1}^n$ ve $D = [L_{k+\min(i,j)-1}]_{i,j=1}^n$ şeklinde Fibonacci ve Lucas sayılarına bağlı olarak genelleştirerek bu matrislerin determinantlarını, terslerini, bazı normlarını ve Hadamard terslerini incelemiş ve $A = [F_{k+\max(i,j)-1}]_{i,j=1}^n$ matrisi ile ilişkili elde edilen bazı bulgular [5] de verilmiştir. Bu çalışmada ise, elemanları Lucas sayıları olan

$$C = [L_{k+\max(i,j)-1}]_{i,j=1}^n = \begin{bmatrix} L_k & L_{k+1} & L_{k+2} & \cdots & L_{k+n-1} \\ L_{k+1} & L_{k+1} & L_{k+2} & \cdots & L_{k+n-1} \\ L_{k+2} & L_{k+2} & L_{k+2} & \cdots & L_{k+n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{k+n-1} & L_{k+n-1} & L_{k+n-1} & \cdots & L_{k+n-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

matrisi ile ilgili aynı tez çalışmasında elde edilmiş bazı bulgular verilecektir. Dolayısıyla, buradan itibaren çalışmamızda bahsi geçecek olan C matrisi yukarıdaki (6) ile verilen matris olup, bu durum her defasında tekrarlanmayacaktır. Şimdi, çalışmamızda faydalanacağımız bazı temel bilgileri verelim.

Tanım 1.2. $L_0 = 2$ ve $L_1 = 1$ olmak üzere $n \geq 2$ için $L_n = L_{n-1} + L_{n-2}$ indirgeme bağıntısı ile tanımlanan sayı dizisi Lucas sayı dizisi olarak tanımlanır [6]. Bu sayı dizisi $\{L_n\}_{n \geq 0}$ ile gösterilir. L_n , n . Lucas sayısı olarak ifade edilir.

n . Lucas sayısı L_n , Binet formülü olarak da adlandırılan

$$L_n = \alpha^n + \beta^n \quad (7)$$

formülü ile de bulunabilir [6]. Burada $\alpha = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ ve $\beta = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$ sayıları, $x^2 - x - 1 = 0$ karakteristik denklemin kökleridir.

Tanım 1.3. $A = (a_{ij})_{m \times n}$ ve $B = (b_{ij})_{m \times n}$ olmak üzere $A \circ B = (a_{ij} \cdot b_{ij})$ ifadesine A ve B matrislerinin Hadamard çarpımı denir [7].

$$r(A) = \max_{1 \leq i \leq m} \sqrt{\sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2} \quad \text{ve} \quad c(B) = \max_{1 \leq j \leq n} \sqrt{\sum_{i=1}^m |b_{ij}|^2} \quad \text{olmak üzere } A \text{ ve } B \text{ matrislerinin Hadamard}$$

çarpımının spektral normu için

$$\|A \circ B\|_2 \leq r(A)c(B) \quad (8)$$

eşitsizliği geçerlidir [7].

Tanım 1.4. $a_{ij} \neq 0$ olmak üzere $A^{-1} = \left(\frac{1}{a_{ij}} \right)_{m \times n}$ şeklinde tanımlı matrise $A = (a_{ij})_{m \times n}$ matrisinin Hadamard tersi denir [7].

Tanım 1.5. $A = (a_{ij})_{m \times n}$ matrisinin Öklid normu

$$\|A\|_E = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanır [7].

Tanım 1.6. A matrisinin spektral normu; $A^H A$ matrisinin mutlak değerce en büyük öz değerinin karekökü şeklinde tanımlanır [7]. Genellikle spektral norm $\|\cdot\|_2$ sembolü ile gösterilir.

Lemma 1.7. $1 \neq x$ reel sayısı için

$$\sum_{k=0}^{n-1} x^k = 1 + x + x^2 + \dots + x^{n-1} = \frac{x^n - 1}{x - 1} \quad (10)$$

ve

$$\sum_{k=1}^{n-1} kx^k = \frac{(n-1)x^{n+1} - nx^n + x}{(x-1)^2} \quad (11)$$

eşitlikleri geçerlidir [3].

II. BULGULAR

Bu bölümde, çalışmamızda elde ettiğimiz bulgular verilecektir. Öncelikle, C matrisinin determinantını ve tersini; (3) ve (4) ile verilen eşitliklerde $i = 1, 2, \dots, n$ için $z_i = L_{k+i-1}$ seçerek ve $L_n = L_{n-1} + L_{n-2}$ eşitliği de kullanılarak Sonuç 2.1 ve Sonuç 2.2 deki gibi elde ederiz.

Sonuç 2.1. $k > 0$ ve $n \geq 2$ olmak üzere C matrisinin determinanı için,

$$|C| = (-1)^{n+1} L_{k+n-1} \prod_{i=0}^{n-2} L_{k+i-1}$$

yazılır.

Sonuç 2.2. t_{ij} , C matrisinin tersinin (i, j) . elemanı olsun. Bu durumda, $k > 0$ ve $n \geq 2$ için

$$t_{ij} = \begin{cases} 0, & |i-j| > 1 \\ -\frac{1}{L_{k+i-2}}, & i = j = 1 \\ -\frac{1}{L_{k+i-3}} - \frac{1}{L_{k+i-2}}, & 1 < i = j < n \\ \frac{1}{|L_{k+i-1} - L_{k+j-1}|}, & |i-j| = 1 \\ \frac{1}{L_{k+i-1}} - \frac{1}{L_{k+i-3}}, & i = j = n \end{cases}$$

şeklindedir.

Teorem 2.3. C matrisinin Öklid normu,

$$\|C\|_E = \left[2(nL_{2n+2k} - (n+1)L_{2n+2k-2} + L_{2k-2}) - (L_{2n+2k-1} - L_{2k-1}) + 2n(-1)^{k+n-1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

eşitliği ile hesaplanır.

İspat: Tanım 1.5, (7)'deki Binet Formülü ve Lemma 1.7'deki eşitlikler kullanılarak

$$\|C\|_E^2 = \sum_{i=1}^n (2i-1)L_{k+i-1}^2 = \sum_{i=1}^n (2i-1)(\alpha^{k+i-1} + \beta^{k+i-1})^2$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \sum_{i=1}^n i (\alpha^{k+i-1} + \beta^{k+i-1})^2 - \sum_{i=1}^n (\alpha^{k+i-1} + \beta^{k+i-1})^2 \\
&= 2 \left(\sum_{i=1}^n i \alpha^{2k-2} (\alpha^2)^i + \sum_{i=1}^n i \beta^{2k-2} (\beta^2)^i + 2 \sum_{i=1}^n i (-1)^{k+i-1} \right) \\
&\quad - \left(\sum_{i=1}^n \alpha^{2k-2} (\alpha^2)^i + \sum_{i=1}^n \beta^{2k-2} (\beta^2)^i + 2 \sum_{i=1}^n (-1)^{k+i-1} \right) \\
&= 2 \left(\sum_{i=1}^n i \alpha^{2k-2} (\alpha^2)^i + \sum_{i=1}^n i \beta^{2k-2} (\beta^2)^i + 2 \sum_{i=1}^n i (-1)^{k+i-1} \right) \\
&\quad - \left(\sum_{i=0}^{n-1} \alpha^{2k} (\alpha^2)^i + \sum_{i=0}^{n-1} \beta^{2k} (\beta^2)^i + 2 \sum_{i=1}^n (-1)^{k+i-1} \right) \\
&= 2 \left(\alpha^{2k-2} \frac{n(\alpha^2)^{n+2} - (n+1)(\alpha^2)^{n+1} + \alpha^2}{(\alpha^2 - 1)^2} + \beta^{2k-2} \frac{n(\beta^2)^{n+2} - (n+1)(\beta^2)^{n+1} + \beta^2}{(\beta^2 - 1)^2} \right. \\
&\quad \left. + 2 \sum_{i=1}^n i (-1)^{k+i-1} \right) - \left(\alpha^{2k} \frac{(\alpha^2)^n - 1}{\alpha^2 - 1} + \beta^{2k} \frac{(\beta^2)^n - 1}{\beta^2 - 1} + \sum_{i=1}^n 2(-1)^{k+i-1} \right) \\
&= 2 \left[n(\alpha^{2k+2n} + \beta^{2k+2n}) - (n+1)(\alpha^{2k+2n-2} + \beta^{2k+2n-2}) + (\alpha^{2k-2} + \beta^{2k-2}) \right] \\
&\quad - \left[(\alpha^{2k+2n-1} + \beta^{2k+2n-1}) - (\alpha^{2k-1} + \beta^{2k-1}) \right] + 2n(-1)^{k+n-1} \\
&= 2 \left[nL_{2k+2n} - (n+1)L_{2k+2n-2} + L_{2k-2} \right] - \left[L_{2k+2n-1} - L_{2k-1} \right] + 2n(-1)^{k+n-1}
\end{aligned}$$

elde edilir.

Teorem 2.4. C matrisinin spektral normu için,

$$\|C\|_2 \leq \sqrt{nL_{k+n-1}^2 ((n-1)L_{k+n-1}^2 + 1)}$$

şeklinde bir üst sınır vardır.

İspat: C matrisini iki matrisin Hadamard çarpımı olarak,

$$\begin{aligned}
C &= \begin{bmatrix} L_k & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ L_{k+1} & L_{k+1} & 1 & \cdots & 1 \\ L_{k+2} & L_{k+2} & L_{k+2} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{k+n-1} & L_{k+n-1} & L_{k+n-1} & \cdots & L_{k+n-1} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1 & L_{k+1} & L_{k+2} & \cdots & L_{k+n-1} \\ 1 & 1 & L_{k+2} & \cdots & L_{k+n-1} \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & L_{k+n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \\
&= X \circ Y
\end{aligned}$$

şeklinde yazalım. Bu durumda,

$$r(X) = \max_{1 \leq i \leq n} \sqrt{\sum_{j=1}^n |X_{i,j}|^2} = \sqrt{nL_{k+n-1}^2}$$

ve

$$c(Y) = \max_{1 \leq j \leq n} \sqrt{\sum_{i=1}^n |Y_{i,j}|^2} = \sqrt{(n-1)L_{k+n-1}^2 + 1}$$

şeklindedir. (8) eşitsizliğine göre,

$$\|C\|_2 = \|X \circ Y\|_2 \leq r(X)c(Y) = \sqrt{nL_{k+n-1}^2 [(n-1)L_{k+n-1}^2 + 1]}$$

elde edilir.

Teorem 2.5. C matrisinin Hadamard tersinin determinant için,

$$|C^{\circ-1}| = \frac{L_{k-1}}{L_{k+n-1}L_{k+n-2}} \prod_{i=2}^n \frac{1}{L_{k+i-1}}$$

yazılır.

İspat:

$$|C^{\circ-1}| = \begin{vmatrix} \frac{1}{L_k} & \frac{1}{L_{k+1}} & \frac{1}{L_{k+2}} & \cdots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ \frac{1}{L_{k+1}} & \frac{1}{L_{k+1}} & \frac{1}{L_{k+2}} & \cdots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ \frac{1}{L_{k+2}} & \frac{1}{L_{k+2}} & \frac{1}{L_{k+2}} & \cdots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{L_{k+n-1}} & \frac{1}{L_{k+n-1}} & \frac{1}{L_{k+n-1}} & \cdots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \end{vmatrix}$$

olup, ikinci satırdan başlanarak her satır (-1) ile çarpılıp bir önceki satıra eklenirse,

$$|C^{o-1}| = \begin{vmatrix} \frac{1}{L_k} - \frac{1}{L_{k+1}} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{L_{k+1}} - \frac{1}{L_{k+2}} & \frac{1}{L_{k+1}} - \frac{1}{L_{k+2}} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{L_{k+2}} - \frac{1}{L_{k+3}} & \frac{1}{L_{k+2}} - \frac{1}{L_{k+3}} & \frac{1}{L_{k+2}} - \frac{1}{L_{k+3}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{L_{k+n-1}} & \frac{1}{L_{k+n-1}} & \frac{1}{L_{k+n-1}} & \dots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \end{vmatrix}$$

elde edilir. Buradan,

$$\begin{aligned} |C^{o-1}| &= \left(\frac{1}{L_k} - \frac{1}{L_{k+1}}\right) \left(\frac{1}{L_{k+1}} - \frac{1}{L_{k+2}}\right) \left(\frac{1}{L_{k+2}} - \frac{1}{L_{k+3}}\right) \dots \left(\frac{1}{L_{k+n-2}} - \frac{1}{L_{k+n-1}}\right) \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ &= \frac{L_{k+1} - L_k}{L_k L_{k+1}} \frac{L_{k+2} - L_{k+1}}{L_{k+1} L_{k+2}} \frac{L_{k+3} - L_{k+2}}{L_{k+2} L_{k+3}} \dots \frac{L_{k+n-1} - L_{k+n-2}}{L_{k+n-2} L_{k+n-1}} \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ &= \frac{L_{k-1}}{L_k L_{k+1}} \frac{L_k}{L_{k+1} L_{k+2}} \frac{L_{k+1}}{L_{k+2} L_{k+3}} \dots \frac{L_{k+n-3}}{L_{k+n-2} L_{k+n-1}} \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ &= \frac{L_{k-1}}{L_{k+n-1} L_{k+n-2}} \prod_{i=2}^n \frac{1}{L_{k+i-1}} \end{aligned}$$

olur.

Teorem 2.6 C matrisinin Hadamard tersinin tersi, $k > 0$ için,

$$(C^{o-1})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{L_k L_{k+1}}{L_{k-1}} & -\frac{L_k L_{k+1}}{L_{k-1}} & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{L_k L_{k+1}}{L_{k-1}} & \frac{L_k L_{k+1}}{L_{k-1}} + \frac{L_{k+1} L_{k+2}}{L_k} & -\frac{L_{k+1} L_{k+2}}{L_k} & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{L_{k+1} L_{k+2}}{L_k} & \frac{L_{k+1} L_{k+2}}{L_k} + \frac{L_{k+2} L_{k+3}}{L_{k+1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & L_{k+n-1} + \frac{L_{k+n-2} L_{k+n-1}}{L_{k+n-3}} \end{bmatrix}$$

şeklindedir.

İspat C matrisinin Hadamard tersi, sağdan ve soldan $n \times n$ tipinde

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

matrisi ile çarpıldığında,

$$I_1 C^{\circ-1} I_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_k} & \frac{1}{L_{k+1}} & \dots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ \frac{1}{L_{k+1}} & \frac{1}{L_{k+1}} & \dots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{L_{k+n-1}} & \frac{1}{L_{k+n-1}} & \dots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{k+n-1}} & \frac{1}{L_{k+n-1}} & \dots & \frac{1}{L_{k+n-1}} \\ \frac{1}{L_{k+n-1}} & \frac{1}{L_{k+n-2}} & \dots & \frac{1}{L_{k+n-2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{L_{k+n-1}} & \frac{1}{L_{k+n-2}} & \dots & \frac{1}{L_k} \end{bmatrix} = C_1$$

elde edilir. C_1 matrisi (2) eşitliğine göre,

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{k+n-1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{k+n-2}} - \frac{1}{L_{k+n-1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{L_k} - \frac{1}{L_{k+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlik, $I_1^{-1} C_1 I_1^{-1} = C^{\circ-1}$ eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$C^{o-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{k+n-1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{k+n-2}} - \frac{1}{L_{k+n-1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{L_k} - \frac{1}{L_{k+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{k+n-1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{k+n-2}} - \frac{1}{L_{k+n-1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{L_k} - \frac{1}{L_{k+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

elde edilir. Bu eşitliğin her iki yanının tersi alınırsa,

$$(C^{o-1})^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{k+n-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{k+n-2}} - \frac{1}{L_{k+n-1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{L_k} - \frac{1}{L_{k+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{L_k L_{k+1}}{L_{k-1}} & -\frac{L_k L_{k+1}}{L_{k-1}} & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{L_k L_{k+1}}{L_{k-1}} & \frac{L_k L_{k+1}}{L_{k-1}} + \frac{L_{k+1} L_{k+2}}{L_k} & -\frac{L_{k+1} L_{k+2}}{L_k} & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{L_{k+1} L_{k+2}}{L_k} & \frac{L_{k+1} L_{k+2}}{L_k} + \frac{L_{k+2} L_{k+3}}{L_{k+1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & L_{k+n-1} + \frac{L_{k+n-2} L_{k+n-1}}{L_{k+n-3}} \end{bmatrix}$$

elde edilir ki ispat tamamlanmış olur.

III. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, elemanları Lucas sayılarından oluşan $C = [L_{k+\max(i,j)-1}]_{i,j=1}^n$ şeklindeki Max matrisinin determinantı, tersi, bazı mormları ve Hadamard tersinin tersi ile determinantı incelenmiştir. C matrisinin determinantı ile tersini, genel Max matrisler için daha önceden elde edilmiş olan bulguların direkt bir uygulaması olarak verdik. C matrisinin Öklid normunu ise Lucas sayılarının Binet formülünü kullanarak elemanter işlemlerle Lucas sayılarına bağlı olarak elde ettik. Maksimum satır ve sütun normları ile spektral norm arasında bilinen bir eşitsizlik kullanılarak C matrisinin spektral normu için bir üst sınır oluşturduk. Ayrıca, Max ve Min matrislerin bilinen çarpanlara ayrılışından faydalanarak C matrisinin Hadamard tersinin determinantını ve tersini hesapladık.

Çalışmamız, Lucas sayılarının Max matrislere bir uygulamasını içermektedir. Elde ettiğimiz sonuçların Lucas sayılarına bağlı olarak elde edilmiş olması ilginçtir. Ayrıca, üzerinde çalışmış olduğumuz C matrisinin karakteristik polinomunun da incelenebileceği ve güzel sonuçlar elde edilebileceği kanısındayız.

KAYNAKLAR

- [1] Mattila, M., & Haukkanen, P. (2016). Studying the various properties of MIN and MAX matrices - elementary vs. more advanced methods. *Spec. Matrices*, 4, 101–109.
- [2] Bahşi, M., & Solak, S. (2015). Some particular matrices and their characteristic polynomials, *Linear and Multilinear Algebra*, 63, 2071-2078.
- [3] Petroudi, S. H. J., & Pirouz, M. (2016). On the bounds for the spectral norm of particular matrices with Fibonacci and Lucas numbers. *Int. J. Adv. Appl. Math. and Mech.* 3(4), 82-90.
- [4] Akyüz, B. (2017). *Fibonacci ve Lucas sayılarının maksimum ve minimum elemanlı matrislerde uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- [5] Bahşi, M., & Akyüz, B. (2017). Fibonacci Sayılarının Maksimum Elemanlı Matrislerde Uygulamaları. I. Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, 7-10 Aralık 2017, Antalya, Türkiye.
- [6] Koshy, T. (2001). *Fibonacci and Lucas Numbers with Applications*. A Wiley-Interscience Publication, New York, USA.
- [7] Horn, R. A., & Johnson, C. R. (1991). *Topics in Matrix Analysis*, Cambridge University Press, New York, USA.

Derleme Makalesi -Review Article

Esterleşme Reaksiyonlarında Katalitik Membran Destekli Pervaporasyon Uygulamaları

Derya Ünlü^{1*}

Geliş / Received: 27/08/2019

Revize / Revised: 13/05/2020

Kabul / Accepted: 29/06/2020

ÖZ

Kimya endüstrisinin gelişmesi, çeşitli kimyasal ve fiziksel işlemlerde daha fazla çözücü kullanılmasına neden olmuştur. Kullanılan solvent miktarının artması da sektöre olan ekonomik yükü arttırmaktadır. Çözücülerin geri kazanılması, yeniden kullanılması ve saflaştırılması endüstrinin temel gereksinimleri haline gelmiştir. Ayrıca yüksek kaliteli, düşük çevresel etkili, verimi yüksek, ekonomik ürün elde edilmesi önemlidir. Katalitik membran destekli pervaporasyon uygulaması, endüstrilerdeki hem reaksiyon hem de ayırma problemlerine yeni alternatif çözümlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Katalitik membran destekli pervaporasyon uygulaması gelişen membran teknolojilerinden biridir. Ayırma ve reaksiyon birimlerini birleştiren hibrit ve entegre bir süreçtir. Bu çalışma, esterleştirme reaksiyonlarının katalitik membran destekli pervaporasyon uygulamaları üzerine yoğunlaşmıştır. İlk olarak, katalitik membran, pervaporasyon ve katalitik membran destekli pervaporasyon hakkında bazı önemli bilgiler verilmiştir. Katalitik membran destekli pervaporasyonun farklı konfigürasyonları tanımlanmış ve açıklanmıştır. Hibrit katalitik membran destekli pervaporasyon işlemlerinin avantajları listelenmiştir. Katalitik membran destekli pervaporasyonu etkileyen faktörler kısaca tartışılmıştır. Literatürdeki önemli katalitik membran destekli pervaporasyon çalışmaları, çalışma koşulları ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Katalitik Membran, Esterleşme, Pervaporasyon, Katalitik Membran Destekli Pervaporasyon Prosesi

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: derya.unlu@btu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5240-5876>)

Kimya Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa, Türkiye

Catalytic Membrane Aided Pervaporation Applications in Esterification Reactions

ABSTRACT

The development of the chemical industry has resulted in the usage more solvents in various chemical and physical processes. The increase in the amount of used solvent also increases the economic burden to the industry. The recovery, reuse, and purification of solvents became the essential requirements of the industry. In addition, the obtainment of high-quality, economic product with low environmental impact and high yield is important. The catalytic membrane aided pervaporation application is considered as one of the new alternative solutions of both reaction and separation problems in the industries. Catalytic membrane aided pervaporation application is one of the developing membrane technologies. It is a hybrid and integrated process combining separation and reaction units. This article is concentrated on catalytic membrane aided pervaporation applications of the esterification reactions. Some important information about catalytic membrane, pervaporation and catalytic membrane aided pervaporation has been firstly reported. Different configurations of catalytic membrane aided pervaporation have been defined and explained. Advantages of the hybrid catalytic membrane aided pervaporation processes have been listed. The factors affecting the catalytic membrane aided pervaporation are briefly discussed. The important catalytic membrane aided pervaporation, reaction conditions and the obtained results in literature are also summarized. The important catalytic membrane aided pervaporation studies in literature, operation conditions and the obtained results have been summarized.

Keywords- *Catalytic Membrane, Esterification, Pervaporation, Catalytic Membrane Aided Pervaporation Process*

I. INTRODUCTION

Nowadays, energy-saving and eco-friendly hybrid applications which are combined with chemical reaction and separation process are received a great deal of attention. These hybrid applications are suitable for especially thermodynamic equilibrium limited reactions, such as esterification reaction, etherification reaction [1].

Esters are used in many chemical industries, such as plasticizers, fragrances, perfumes, varnishes, synthetic resins, and adhesives [2]. For this purpose, large quantities of ethyl acetate and butyl acetate are commercially produced. For example, ethyl acetate is one of the most important solvents in the chemical industry. It is used in the production of perfumes, plasticizers, varnishes, synthetic resins, and adhesives. In addition, esters are rather important because many of them have characteristic tastes and odors for using in food and aroma industries [3-4].

Esters are synthesized with the reaction of carboxylic acid with alcohols by the presence of acid catalyst. According to reaction mechanism, firstly, the carbonyl oxygen is protonated by the acid groups of catalysts. This step makes the carbonyl carbon a much better electrophile. This carbonyl carbon interacts with alcohol. The carbonyl carbon bonds with a pair of oxygen and π bond breaks. The electrons from π bond interact with oxygen, and oxonium ion achieves. This oxonium ion is deprotonated the alcohol and tetrahedral intermediate forms. One of the hydroxyl groups in tetrahedral intermediate takes the proton from protonated alcohol. The elimination of water occurs, and protonated ester achieves. Finally, the ester is deprotonated, and then reaction is completed [5].

Esterification is a commonly used chemical reaction in industry. Esterification reactions are equilibrium reactions. Obtaining high efficiency is possible with the use of excess amounts reactant usage or removing one of the products from the reaction mixture. These techniques change the reaction equilibrium towards the product side. The different separation methods have been combined with the reactor to change the reaction equilibrium. Among these, pervaporation is an alternative separation technology [6-7]. Pervaporation is a membrane based separation process. Application areas are the dehydration of aqueous mixtures, separation of organics from aqueous mixtures, or separation of organic-organic mixtures. Pervaporation is used for the separation of azeotropic mixtures and close boiling-point mixtures. Pervaporation has a great number of advantages according to the conventional separation process "distillation". For instance, azeotropic distillation requires the usage of entrainer for recovery of pure solvents, this means additional cost. Also, high energy consumption and the formation of waste are other disadvantages of azeotropic distillation. Another distillation method is reactive distillation. In order to use the reactive distillation, process needs a great difference in the volatility of product and reactants. Moreover, the combination of reaction and distillation is rather complex in reactive distillation. The most important disadvantage of reactive distillation is high energy consumption and high cost. The most important disadvantage of reactive distillation is high energy consumption and high cost, and high reflux ratio requires. If the feed solution or reaction solution forms azeotropic mixture, the reactive distillation process cannot be used [8]. Pervaporation is important alternative process due to the low energy consumption, environmentally friendly technology, no need to additional chemical [9-13]. The low flux value is an important disadvantage of the pervaporation process. In addition weak membrane properties appear as a significant problem in pervaporation. However, these problems can be overcome with modification of membranes [14-17].

Hybrid processes, combining pervaporation with the reactor, are becoming increasingly common in industry. Both the combination of reaction and separation in a single unit and also increment of conversion make attractive to catalytic membrane aided pervaporation applications. High separation and reaction selectivity, low energy consumption, low operation and investment cost, and compact and modular design are advantages of the catalytic membrane aided pervaporation process [18-19].

In general, polymeric membranes are preferred in catalytic membrane aided pervaporation. Working at low temperature has resulted in energy saving. Dense, homogenous membranes are mostly used for the pervaporation process. Enzymes, homogeneous, and heterogeneous catalysts are added to the polymeric membrane and catalytic membranes are obtained. The usage of enzymatic catalytic membrane eliminates the

product inhibition for the biochemical reaction. Also, homogeneous and heterogeneous catalysts loaded catalytic membranes can be removed from the reaction mixture easily and reused without any treatment [20].

In catalytic membrane aided pervaporation process, while reaction occurs in the catalytic area of the membrane, the separation is carried out in the separation matrix of membrane. The reaction conversion increases with the removal of one of the products selectively from the reaction medium. The catalytic membrane aided pervaporation process is usually operated with high separation efficiency and high conversion [21-24].

In this paper, applications of catalytic membrane aided pervaporation process for esterification reaction has been reviewed and discussed. Design of system, process parameters and recent applications have been also analyzed.

II. CATALYTIC MEMBRANE

The membrane in which reaction and separation occur in a single step is defined as the 'catalytic membrane'. The investigation of catalytic membranes is quite new in pervaporation applications. The main advantage of the catalytic membrane application is energy-saving [25].

The combination of selective separation and catalytic functions in a single layer is related to the properties of the used substance. For example, to achieve the high water selectivity, the diffusion of all components outside the water through the membrane should be in low value. To use the catalytic properties effectively, diffusion of the reactants must be high [20].

To obtain the catalytic membrane, the membrane is combined or coated with catalyst or membrane material that demonstrates catalytic feature spontaneous. These are also divided into sub-classes. Catalyst is wrapped on the membrane or the heterogeneous catalyst is embedded in the polymer matrix [26]. When the heterogeneous catalyst is embedded with the polymer matrix, the well-selected polymeric environment makes a positive effect on catalyst performance by controlling the selective sorption of the reactants and products [27].

The used catalysts in catalytic membranes can be homogeneous or heterogeneous catalysts. High reaction yield can be obtained easily by using a homogeneous catalyst in a short time. However, homogeneous catalysts have a number of operational disadvantages. Recovery and reuse is rather difficult. The homogeneous catalysts also cause corrosion problems in reactor. To overcome these problems, homogeneous catalysts are added to the polymeric matrix, and catalytic membranes as heterogeneous catalyst are obtained [28, 29]. Recovery and reuse of heterogeneous catalysts is possible [29-30]. However, heterogeneous catalysts might be leached in the reaction mixture. Leaching decreases the catalytic activity of the catalyst [31]. In addition, to recovery of heterogeneous catalyst from the reaction mixture requires the additional separation process, and to reuse of the catalyst need such as neutralization and washing steps [32].

Figure 1 shows the combination of the selective and catalytic layers. Acid and alcohol diffuse into the catalytic layer and react, convert to ester or water. The resulting ester is diffused back into the feed mixture and the water is separated from the selective layer of the membrane. The thinness of the catalytic layer over the membrane support provides more effective usage [20].

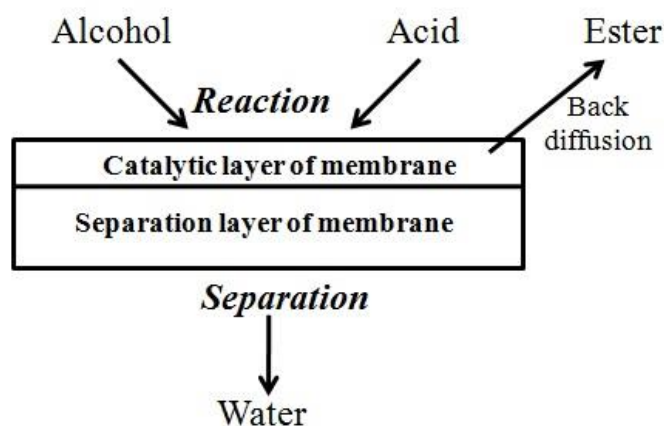


Figure 1. The working principle of the catalytic composite membrane

In catalytic membrane aided pervaporation, there is no mass transfer limitation problem. Choosing a convenient polymeric materials can adjust the diffusion of reactants and products. The determination of optimum polymer concentration is rather important for the catalytic activity. Under this condition, the reactants contact easily with catalysts. High polymer concentration makes the diffusion difficult and prevents the reactants to reaching active sites of the catalyst. The presence of diffusion channels between the polymer molecules in the membrane leads to a high diffusivity of reactants along the membrane by the concentration gradient and reactants reach the active groups of the catalyst without any resistance. Therefore, optimum polymer concentration is an important parameter. The presence of diffusion channels between the polymer molecules in the membrane leads to a high diffusivity of reactants along the membrane by the concentration gradient and reactants reach the active groups of the catalyst without any resistance. The reaction materializes in the reaction mixture-membrane interface, high conversions achieves with the catalytic membrane [33].

Catalytic membrane aided pervaporation involves not only mass transport along the membrane but also heat transfer. Pervaporation process involves a phase change from a liquid solution to a vapor solution. This change is required the vaporization enthalpy of liquid feed stream. Consequently, the feed temperature decreases. The permeate stream is vaporized on the permeate side of the membrane. The heat of feed side is used. Due to the reducing of temperature, the partial pressure of the components and the driving force for mass diffusion decrease. Re-heating is required. Therefore, the controlled and continuous heating is required in the catalytic membrane aided pervaporation [8].

The usage of the catalytic membrane provides the opportunity to reuse of catalyst and no need neutralization of catalyst. The catalytic membrane can be omitted from the reaction medium easily and reused without any treatment [34].

III. PERVAPORATION

Pervaporation is used in the dehydration of organic solvents, in the removal of volatile organic compounds from aqueous solutions, in the separation of organic-organic mixtures. There is a great number of studies in literature for the first two applications. Pervaporation is rather successful in these applications.

The chemical structure of the membrane is not damaged from the feed mixture. The membrane should be demonstrated selectivity to only one component in the feed mixture. At this point, the selection of membrane for the separation of organic-organic mixtures is quite difficult. In typical pervaporation processes, while the flux value of the membrane is obtained as high, the selectivity values are usually low. Pervaporation also has advantages when it is used as a hybrid with other processes [35]. The example of a hybrid process is shown schematically in Figure 2.

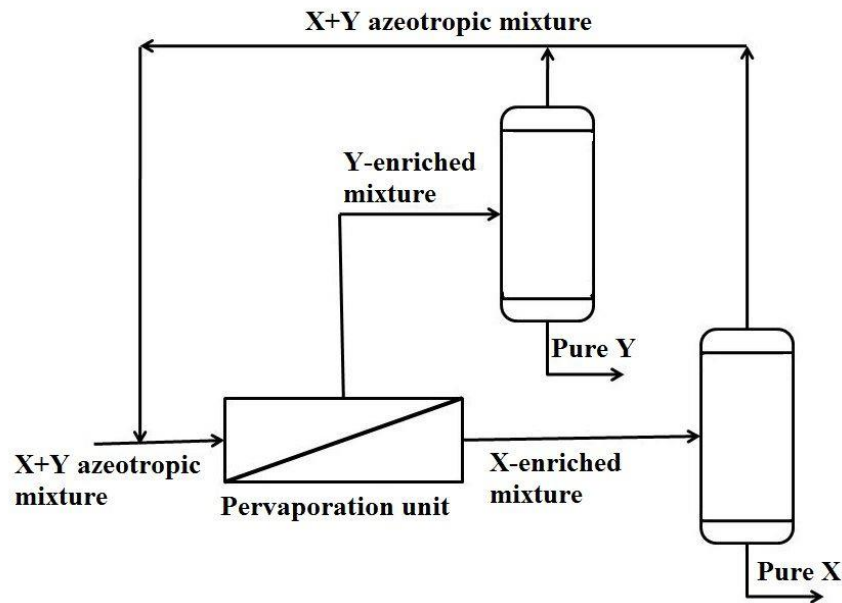


Figure 2. Scheme of pervaporation-distillation for the azeotropic separation

In the single-step pervaporation of the azeotropic mixture of A-B, the membrane has a high affinity to component A, so the permeate side contains component A. B remains in the retentate side. To acquire the component of B as pure, B should be fed to the distillation unit. In the pervaporation process, liquid mixture contacts with the top side of the membrane, the vacuum is applied on the downside, diffusion occurs, and permeate stream obtains. Pervaporation by vacuum pump is shown in Figure 3 (a). The alternative to vacuum, carrier gas can be used for the creation of pressure difference. This type of pervaporation can be seen in Figure 3 (b). In pervaporation, the permeate stream is collected as the vapor phase in the cold trap; it condensed and obtained in liquid form.

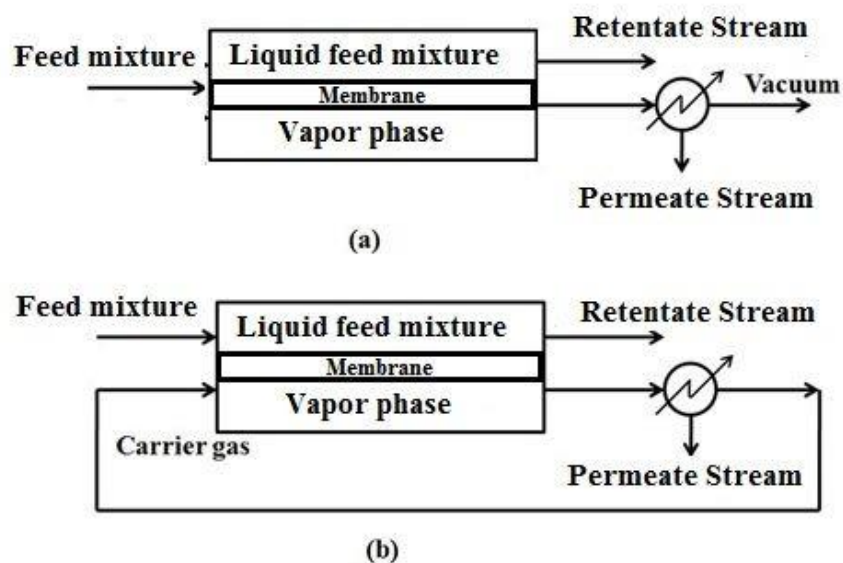


Figure 3. Scheme of pervaporation (a) by using vacuum (b) by using carrier gas

The purification behavior of pervaporation is characterized by flux and selectivity.

Selectivity is described as shown in Equation 1.1;

$$\alpha_{ab} = \frac{C_{a_p}/C_{b_p}}{C_{a_f}/C_{b_f}} \quad (1)$$

C_a and C_b are the concentrations of a and b components. p and f define the permeate and the feed, respectively. The separation factor depends on the solubility and diffusivity of the components in the membrane, and the interaction between the membrane and the feed solution [36].

There are two types of selectivity as solubility selectivity and diffusion selectivity. Solubility selectivity is rather important for the separation. One of the components in the feed shows high solubility value in the membrane. This component significantly affects the swelling degree of the membrane. Higher swelling may cause to decreasing in selectivity and decreasing of mechanical strength of membranes. The blending of polymers, cross-linking, concentrated emulsion polymerization, copolymerization, etc. are used for the preparation of membranes with the desired properties [35].

Flux is described as the weight of substance through the membrane at a unit of time, per unit active area of the membrane. Flux depends on the thickness and permeability of the membrane [37]. The flux is shown in Equation (1.2);

$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{dx} \quad (2)$$

J_i ; flux of i component ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$), D_i ; diffusion coefficient of i component (cm^2/h), dC_i/dx ; concentration gradient [38].

The driving force in pervaporation is chemical potential gradient. Transport through the membrane is defined with the "solution-diffusion mechanism". This transport mechanism is shown in Figure 4. In this mechanism, the membrane has a high affinity to one of the components in the feed solution and this component is absorbed perfectly and dissolves in the dense membrane. The component transports along the membrane by the diffusion process and desorbs from the downside of the membrane [39].

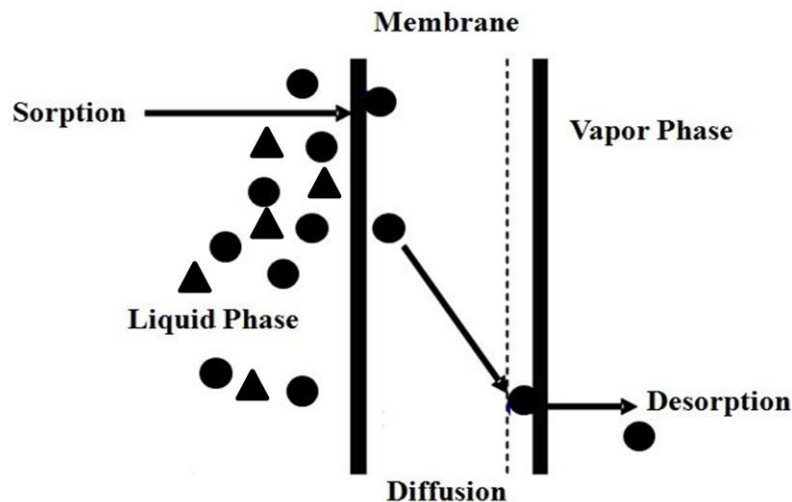


Figure 4. Solution-diffusion mechanism

Mechanism of solution-diffusion consists of three steps:

- 1) Sorption: The components at the membrane/feed solution interface are absorbed into the membrane by selective sorption behavior.
- 2) Diffusion: The absorbed components are diffused through the membrane under the chemical potential gradient.
- 3) Desorption: The components passing through the membrane are separated in the vapor phase [30, 40].

The separation success of the membrane is related to the solubility of components on the membrane and diffusivity of the components through the membrane. Transport is provided with differences in pressure. The feed mixture is usually under atmospheric pressure. Therefore, the driving force for transport through the membranes is obtained by reducing the partial vapor pressure on the downstream [39].

IV. CATALYTIC MEMBRANE AIDED PERVAPORATION (PERVAPORATION MEMBRANE REACTOR)

The aim of the combination of chemical reactor and membrane unit is to realize the reaction and separation in one unit. Nowadays the membrane is not used only as a separator, but also as a catalyst. Reaction and separation are realized simultaneously in the pervaporation process by using catalytic membranes. This process is catalytic membrane aided pervaporation. This process is known as the pervaporation catalytic membrane reactor (PVCMR) in literature [41]. Figure 5 shows the schematic of the catalytic membrane aided pervaporation [42].

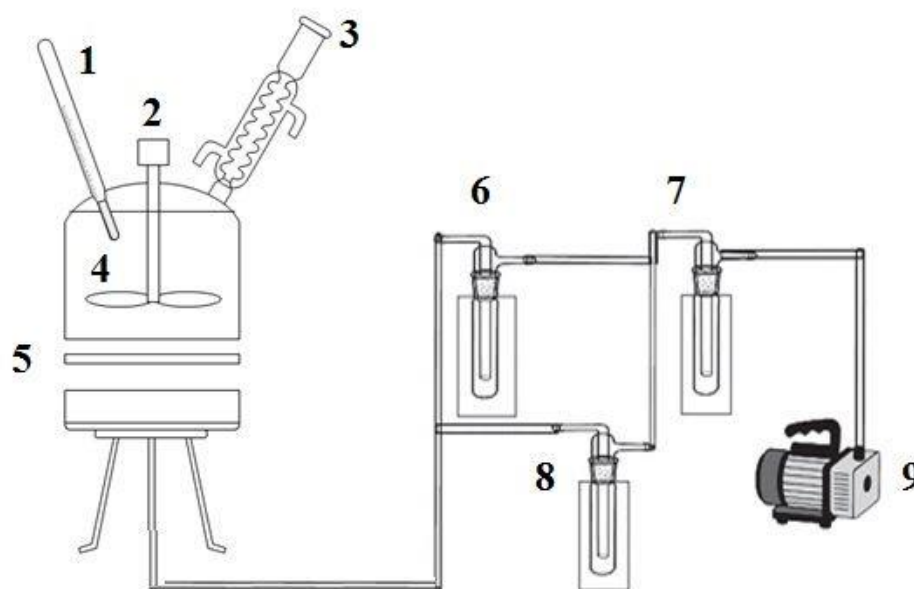


Figure 5. Catalytic Membrane Aided Pervaporation: (1) temperature measurement device; (2) mechanical mixer; (3) condenser; (4) reaction vessel; (5) membrane; (6, 7 and 8) Cold traps; (9) vacuum pump.

A. The Advantages Of Catalytic Membrane Aided Pervaporation

In recent years, catalytic membrane aided pervaporation is utilized as the innovative, energy-saving and environmentally friendly separation technology. The aim of the usage of the pervaporation process is the

removal of one of the products in the reaction mixture and change the reaction equilibrium. Thus, the full conversion of reactants is acquired.

The catalytic membrane aided pervaporation process has some advantages according to the conventional batch reactor. These advantages have been listed below.

- 1) The membrane acts as an active role in reactive processes.
- 2) The catalytic membrane aided pervaporation creates closer contact between reactants and catalyst.
- 3) When a homogeneous or heterogeneous catalyst is embedded in the membrane, the recovery, regeneration and reuse of the catalyst are possible.
- 4) Reaction and separation are carried out simultaneously and conversion is increased.
- 5) While the reactants remain in the reactor, the products are removed.
- 6) Pervaporation is a rate controlled process; separation is not limited by volatility such as distillation.
- 7) Pervaporation process can be carried out by an appropriate membrane at the low reaction temperature for the reaction, which is a good alternative for temperature sensitive catalysts and products.
- 8) Undesired byproducts and reactions are prevented.
- 9) Recycling of intermediate products is possible, otherwise undesirable reactions may occur if the reactants remain in the reactor
- 10) High conversion is obtained at stoichiometric feed flow rates.
- 11) Reaction heat can be used in separation.
- 12) Low capital investment.
- 13) Low reaction time.
- 14) Mild operation conditions.

The catalytic membrane aided pervaporation has been a substantial alternative process to conventional process due to these advantages [44-47].

B. Factors Affecting Catalytic Membrane Aided Pervaporation Process

The effect of the four different operation conditions on the conversion and separation was investigated in three groups:

- Factors affecting the direct esterification reaction (catalyst concentrations and molar feed ratios)
- Factors directly affecting pervaporation kinetics (ratio of membrane area to reaction volume)
- Factors affecting the esterification reaction and the pervaporation kinetics at the same time (temperature)

Temperature is the most important parameter for affecting system performance. The reaction rate increases with temperature due to the Arrhenius law, and pervaporation also accelerates with temperature. The vapor pressures of components are increased with temperature in pervaporation.. This creates the driving force and facilitates diffusion.

The second important parameter is the molar feed ratio. The usage of a high molar feed ratio requires additional separation step for the recycles of the non-reacting components.

The third factor is the ratio of membrane area to reaction volume. This is an important factor for pervaporation. The ratio of membrane area to reaction volume can be changed by using membranes with different areas or using the different reaction volumes.

Catalyst concentration has a weak effect on the catalytic membrane aided pervaporation system [48].

C. Configurations of Catalytic Membrane Aided Pervaporation Process

There is different type of catalytic membrane aided pervaporation configurations. Batch, recycle batch, and recycle continuous and continuous catalytic membrane aided pervaporation processes are shown in Fig. 6.

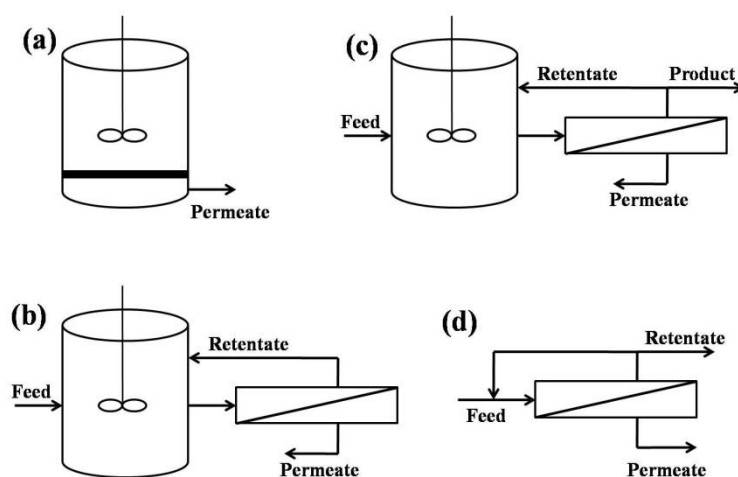


Figure 6. Pervaporation aided esterification reaction flow diagrams (a) batch (b) recycle batch (c) recycle continuous (d) continuous.

Batch and recycle batch configurations in Figure 6 a, b are usually preferred in the catalytic membrane aided pervaporation process. The membrane is placed in the batch reactor configuration. Reactor and separation are two different units in the recycling batch configuration. In this process, the liquid reaction mixture is dehydrated in the membrane unit and the other components return to the reactor. This process has an advantage: the membrane area is separated from the reactor volume. The cleaning of membrane is easy in this configuration. Two membrane modules can be used. The other one can be cleaned while one of them is in operation. In case of failure of the second membrane module, the process can be carried out with the other membrane module.

Recycle continuous configuration is shown in Figure 6 (c). When compared with the recirculating batch catalytic membrane aided pervaporation process (Figure 6 (b)), feed and product stream are separate in the configuration and the product is manufactured continuously. The continuous process is used in a large volume reactor. As shown in Figure 6 (d), membrane and reactor are combined in a single unit for the tubular flow continuous configuration. The advantages of the combination of membrane and reactor in a single unit are efficient production and separation, modular design, decrement of energy, operation, and investment costs [20].

D. Applications of Catalytic Membrane Aided Pervaporation Process

Sun et al. (2020) synthesized the polyvinyl alcohol/ SO_4^{2-} -anodic aluminium oxide (PVA/ SO_4^{2-} -AAO) membranes. SO_4^{2-} -AAO was used as the catalyst. The catalytic activity of membrane was examined in the esterification between ethanol and acetic acid. Acid conversion value reached above 96% after the 16-hours'

reaction in the pervaporation aided esterification. The synthesized membrane had excellent stability. After 5 reuse, acid conversion value remained above 90% [49].

Li et al. (2020) conducted the esterification reaction of oleic with methanol in the pervaporation catalytic membrane reactor. Poly (vinyl alcohol) (PVA) hybrid catalytic membranes were prepared for this reaction. The PAL-PIL was chosen as a solid catalyst. The highest separation performance was obtained as separation factor of 111 and total flux of $397 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ for 80 wt% ethanol aqueous at 70°C [50].

Cao et al. (2020) produced the yeast-immobilized catalytic membrane by using phase inversion method. The separation layer of membrane was prepared by using polydimethylsiloxane (PDMS) and the catalytic layer was fabricated by coating a porous yeast/polyether sulfone on separation layer. An increase of 35% was observed in ethanol productivity. The catalytic membrane showed a stable structure in four cycles of pervaporation membrane reactor experiments [51].

Li et al. (2019) prepared the catalytic composite membrane. Catalytic layer of membrane was comprised of homogeneous catalyst “poly (styrene sulfonic acid)” and polyvinyl alcohol. The separation layer of membrane was blended of sodium alginate and polyvinyl alcohol. The prepared catalytic membrane was used to synthesis of ethyl propionate. While the reaction conversion was obtained as 91.6%, flux and separation factor were obtained as $260 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ and 91 [52].

Zhang et al. (2019) synthesized the ionic liquids-functionalized PVA catalytic membrane. Pervaporation enhanced the conversion as a ratio of 19% [53].

Unlu and Hilmioglu (2019) prepared the phosphomolybdic-acid-loaded PVA membrane for the esterification reaction of glycerol with acetic acid. The reaction was attempted under mild operation conditions according to literature (75°C , catalyst concentration 5 wt %, and molar feed ratio 6:1). Under these reaction conditions, while the glycerol conversion was obtained as 100%, the selectivity of triacetin was obtained as 76% [54].

Unlu and Hilmioglu (2018) studied the reaction of levulinic acid with ethanol by using the sulfosuccinic acid loaded chitosan membrane. The sulfosuccinic acid is a homogeneous liquid catalyst. 93.33% of levulinic acid conversion was achieved in the catalytic membrane aided pervaporation process [55].

The catalytic membrane aided pervaporation process has been also studied by Unlu et al. (2017) for fuel bioadditive ethyl levulinate production. The authors prepared the sulfated zirconia catalyst and used it to synthesize of the catalytic membrane. The hydroxyethyl cellulose was chosen as a polymeric matrix. The hydroxyethyl cellulose membrane showed high good separation behavior. Conversion of catalytic membrane aided pervaporation process was 95% compared to 34.92% without pervaporation [56].

Nigiz and Hilmioglu (2017) prepared catalytic membrane by the use of boric acid as catalyst and the use of carboxymethyl cellulose as polymeric matrix and were utilized in a catalytic membrane aided pervaporation process system to synthesize ethyl lactate. While the maximum conversion was obtained as 54 % in the batch reactor with initial feed molar ratio of 3, 83 % lactic acid conversion was achieved at the same feed molar ratio in the PVC MR [57].

Rhizomucor miehei lipase-coated alginate biocatalytic membrane has been suggested by Nigiz and Hilmioglu (2017) for the production of ethyl lactate. The effects of reaction parameters, such as the amount of lipase, reaction temperature and initial molar ratio, on lactic acid conversion were investigated to evaluate the performance of the system. The highest lactic acid conversion was obtained as 63 % in the pervaporation biocatalytic membrane reactor at 50°C , while the lactic acid conversion was 37% in the batch reactor under the same reaction conditions. The obtained results were shown that the pervaporation biocatalytic membrane reactor is a good alternative for the ethyl lactate reaction [58].

Qing et al. (2017) carried out the catalytic membrane aided pervaporation process using $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ loaded PVA membrane. A 43% conversion increment was realized according to the equilibrium conversion. Esterification of acetic acid with n-butanol was chosen as a model reaction [59].

Unlu and Hilmioglu (2016) studied in the catalytic membrane aided pervaporation process with $Zr(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ coated chitosan pervaporation membranes for the production of ethyl acetate. The composite catalytic membrane was prepared by the coating and solution casting method. $Zr(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ was used as a heterogeneous catalyst in the catalytic layer of the membrane. The catalytic layer was coated on the selective layer. Esterification is a typical equilibrium reaction controlled by thermodynamic. The reaction was carried out in the batch reactor, and catalytically active membrane reactor and performances of reactors were compared. The effect of reaction parameters, such as temperature, catalyst loading and initial mole ratio on the acetic acid conversion was investigated. The acetic acid conversion reached to 85% under the optimum reaction conditions. Conversion value increased by approximately 55% compared to the equilibrium conversion value at the same reaction conditions [42].

A novel composite structure was utilized by Zhang et al. (2014) for the production of n-butyl acetate. The catalytically active pervaporation membrane had three layers. The top layer of the membrane was a porous catalytic layer, the middle layer is the dense PVA selective layer and the bottom layer is the commercially available PES support layer. Styrene-divinyl benzene copolymer beads were used as a catalyst in the catalytic layer of the membrane. Acetic acid conversion reached 91.4% in 20 h at 85°C, while the equilibrium conversion was only 71.9% in the same reaction conditions. The catalytic membrane was represented good performance in consecutive pervaporation experiments, and it can confirm by SEM images [60].

Zhang et al. (2014) studied in lauryl stearate production by lipase-catalyzed esterification, using a bio catalytic membrane. *Candida rugosa* lipase was immobilized polyvinyl alcohol (PVA) membrane. Polyvinyl alcohol (PVA)/polyether sulfone (PES) bilayer was prepared. The composite membrane was characterized by SEM analyses and the “sandwich-like” membrane structure was observed in the SEM images. PVA/PES composite membrane showed better thermal and pH stability according to free lipase. The membrane had the recycle and reuse features. The conversion enhancement of approximately 40% was observed in a pervaporation membrane reactor compared to the batch reactor. Removal of by product water by pervaporation process would help improve the lipase activity. Pervaporation process also shifted the equilibrium of the reaction to the product direction, thus acid conversion was increased [61].

Liu and Chen (2002) presented a model for the production of n-butyl acetate by $Zr(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ catalyst loaded membrane in catalytic membrane aided pervaporation process. The effect of temperature, the initial mole ratio of acetic acid over n-butanol, the ratio of the effective membrane area over the volume of reacting mixture and catalyst content, on the esterification yield was investigated. Similar numerical and experimental results were obtained in the model equations [62].

The PVA pervaporation catalytic membrane was prepared on porous ceramic plate support by Zhu and Chen (1998) to study the acetic acid/ethanol esterification reaction. SEM (scanning electron microscopy), IR (infra-red) (ATR) (attenuated total refraction) and XPS (X-ray photoelectron spectrometry) were used to characterize the catalytic membrane structure. The reaction was carried out in a catalytic membrane aided pervaporation process. The conversion of n-butyl alcohol was obtained as 95% by using PVA catalytic membrane. Different reaction parameters, temperatures, catalyst concentrations, and initial reactant molar ratios were studied experimentally [63].

TiO_2 -SPPEK-PES nanocomposite membranes have been used by Ma et al. (2013) in the esterification reaction of acetic acid with ethanol. The pore structure and morphology, water uptake, hydrophilic nature, degree of geometric swelling, mechanical properties and catalytic properties of the nanocomposite membranes were investigated. The kinetic model was described for the reaction. TiO_2 -SPPEK-PES nanocomposite membranes show good stability and mechanical properties [64].

Amberlyst 15 catalysts loaded composite ceramic/poly (vinyl) alcohol membranes were prepared by Peters et al. (2007) for the production of butyl acetate. The catalytic membrane was prepared by using dip-coat technique. The catalytic membrane is responsible for the catalytic activity and water removal [65].

Peters et al. (2005) also prepared the zeolite-coated membrane layers by dip-coating technique. TEOS and Ludox AS-40 were used as binder material for the deposition of zeolite H-USY on silica membranes. Membrane pre-treatment and the addition of the binder were found as important parameters [66].

Liu et al. (1999) studied in a pervaporation assisted catalytic membrane reactor for the manufacturing of n-butyl acetate by $H_3PW_{12}O_{40}$ /Polyvinyl alcohol (PVA) catalytic membranes on porous ceramic plates. SEM (scanning electron microscopy) and XPS (X-ray photoelectron spectrometry) were used to characterize the membrane structure. The membrane structure does not change after the 24 h reaction time [67].

Figueiredo et al. (2008) synthesized the catalytic composite membrane. While the separation layer of the membrane was the Pervap 1000, the catalytic layer of membrane was catalyst loaded PVA membrane. Synthesis of ethyl acetate was chosen as a model reaction. Amberlyst 15 and Amberlyst 35 were used as the catalyst. A catalytic membrane was synthesized by coating the Pervap membrane with a thin layer. The catalytic layer included catalyst particles in poly (vinyl alcohol) solution. 60% conversion enhancement was determined in the catalytic membrane reactor [68].

Composite catalytic membrane "zeolite coated ceramic membrane" was used by Peters et al. (2005) for the synthesis of butyl acetate. Conversion of acid was obtained as 85% in a catalytic membrane aided pervaporation process [24].

Bagnell et al. (1993) was used Nafion membranes for the synthesis of esters with different alcohols. Nafion membrane has catalytic properties. The yields of esters as methyl acetate and n-butyl acetate were determined as 77% and 95%, respectively [69].

David et al. (1992) were prepared the blend membranes by using the poly (acrylonitrile) (PAN)-poly (styrene sulfonic acid) (PSSA) and the poly (vinyl alcohol) (PVA)-PSSA. The reaction was carried out for 12 h. Conversion was obtained as 80% at the end of the 12 h [70].

All studies in literature show that catalytic membrane aided pervaporation give high reaction and separation yield according to the conventional process. In addition, this technology has some important advantages such as economical, low energy consumption, environmental friendly, easy installation, scale up, etc. Catalytic membrane aided pervaporation is considered that it will be one of the significant technology in the future. In recent years, it is not used only in laboratory scale but also used in industrial scale. The integration of the reaction and separation in a single step is an important alternative to the batch processes for industry. Catalytic membrane aided pervaporation is promising technology for both nowadays and future. Obtaining a product of high quality and purity in a single unit is possible with catalytic membrane aided pervaporation.

V. CONCLUSION

The catalytic membrane aided pervaporation processes receive a great deal of attention in recent years. The catalytic membrane aided pervaporation process is considered as an alternative to the reactive distillation process. In this paper, it has been shown the various catalytic membrane aided pervaporation configurations. The configurations have been classified as batch, continuous and recycle. The design types are explained and the advantages of different configurations are listed and compared to each of them.

The main advantage of catalytic membrane aided pervaporation is energy-saving. Additional separation step is not required. Also, the usage of catalytic membrane is a good alternative to other homogeneous and heterogeneous catalysts. Because, homogeneous and heterogeneous catalysts have some problems such as corrosion for the reactor and separation from the reaction mixture. However, the catalytic membranes can be used repeatedly and recovery and reuse are easy.

The chosen of membrane material is rather important for the performance of catalytic membrane aided pervaporation. Membrane material takes a role in the sorption and diffusion of reactants and products. In this paper, a search of the application of catalytic membrane for the esterification reaction in the literature was given. Studies in the catalytic membrane aided pervaporation process are limited in the literature. The catalytic membrane studies by using pervaporation are summarized in the paper.

In most cases, hydrophilic membranes have been chosen as the polymeric material in the catalytic membrane aided pervaporation applications because water is a by-product and undesired product for the esterification reactions. Hydrophilic membranes also prevent the diffusion of the organic components from the membrane and keep the catalysts in the membrane. High conversion and high selectivity values are acquired in the catalytic membrane aided pervaporation processes due to the removal of water.

In brief, catalytic membrane aided pervaporation is an innovative reaction aided separation technology. It is an economic, safe and eco-friendly process. In the future, it is believed that catalytic membrane aided pervaporation will find application in the industry if suitable, mechanical and chemical stable and long lived of membrane is developed.

REFERENCES

- [1] Rathod, A. P., Wasewar, K. L., & Sonawane, S. S. (2013). Enhancement of esterification reaction by pervaporation reactor: an intensifying approach. *Procedia Engineering*, 51, 330–334.
- [2] Yanti, H., Wikandari, R., Millati, R., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2014). Effect of ester compounds on biogas production: beneficial or detrimental?. *Energy Science & Engineering*, 2(1), 22–30.
- [3] Yuan, H.-K., Ren, J., Ma, X.-H., & Xu, Z.-L. (2011). Dehydration of ethyl acetate aqueous solution by pervaporation using PVA/PAN hollow fiber composite membrane. *Desalination*, 280(1-3), 252–258.
- [4] Zhang, X. H., Liu, Q. L., Xiong, Y., Zhu, A. M., Chen, Y., & Zhang, Q. G. (2009). Pervaporation dehydration of ethyl acetate/ethanol/water azeotrope using chitosan/poly (vinyl pyrrolidone) blend membranes. *Journal of Membrane Science*, 327(1-2), 274–280.
- [5] Brown, W., Foote, C., Iverson, B., & Anslyn, E. (2011). *Organic Chemistry*, 5th Edition, Brooks/Cole Cengage Learning, USA.
- [6] Wasewar, K., Patidar, S., & Agarwal, V. K. (2009). Esterification of lactic acid with ethanol in a pervaporation reactor: modeling and performance study. *Desalination*, 243(1-3), 305–313.
- [7] Das, S., Banthia, A.K., & Adhikari B. (2007). Improved conversion to ethyl acetate through removal of water of esterification by membrane pervaporation. *Indian Journal of Chemical Technology*, 14, 552–559.
- [8] Cannilla, C., Bonura, G., & Frusteri, F. (2017). Potential of Pervaporation and Vapor Separation with Water Selective Membranes for an Optimized Production of Biofuels—A Review. *Catalysts*, 7, 187.
- [9] Marszałek, J., Rdzanek, P., & Kamiński, W. (2014). Improving performance of pervaporation membranes for biobutanol separation. *Desalination and Water Treatment*, 56(13), 3535–3543.
- [10] Wang, Q.W., Shi, B.L., & Ji, L.Y., (2014). Pervaporation separation of ethanol via adsorbent-filled silicon rubber membranes. *Membrane Water Treatment International Journal*, 5, 265-279.
- [11] Chapman, P. D., Oliveira, T., Livingston, A. G., & Li, K. (2008). Membranes for the dehydration of solvents by pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 318(1-2), 5–37.
- [12] Shi, G. M., Zuo, J., Tang, S. H., Wei, S., & Chung, T. S. (2015). Layer-by-layer (LbL) polyelectrolyte membrane with Nexar™ polymer as a polyanion for pervaporation dehydration of ethanol. *Separation and Purification Technology*, 140, 13–22.
- [13] Meireles, I. T., Portugal, C., Alves, V. D., Crespo, J. G., & Coelho, I. M. (2015). Impact of biopolymer purification on the structural characteristics and transport performance of composite polysaccharide membranes for pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 493, 179–187.

- [14] Toti, U. S., & Aminabhavi, T. M. (2004). Synthesis and characterization of polyacrylamidegrafted sodium alginate membranes for pervaporation separation of water + isopropanol mixtures. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(3), 2030–2037.
- [15] Toti, U. S., & Aminabhavi, T. M. (2004). Different viscosity grade sodium alginate and modified sodium alginate membranes in pervaporation separation of water + acetic acid and water + isopropanol mixtures. *Journal of Membrane Science*, 228(2), 199–208.
- [16] Naidu, B.K., Sairam, M., Raju, K., & Aminabhavi, T. (2005). Thermal, viscoelastic, solution and membrane properties of sodium alginate/hydroxyethylcellulose blends. *Carbohydrate Polymers*, 61(1), 52–60.
- [17] Naidu, B.V.K., Rao, K.S.V.K., & Aminabhavi, T.M. (2005). Pervaporation separation of water+1,4-dioxane and water+tetrahydrofuran mixtures using sodium alginate and its blend membranes with hydroxyethylcellulose—A comparative study. *Journal of Membrane Science*, 260(1-2), 131–141.
- [18] Ozdemir, S., Buonomenna, M., & Drioli, E. (2006). Catalytic polymeric membranes: preparation and application. *Applied Catalysis A: General*, 307(2), 167–183.
- [19] Bruggen, B.V. (2010). *Pervaporation Membrane Reactors. Comprehensive Membrane Science and Engineering 1st ed.* Academic Press, Oxford, 135–163.
- [20] Peters, T.A. (2006). *Catalytic pervaporation membranes for close integration of reaction and separation*, Phd Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- [21] Zhu, M.-H., Feng, Z.-J., Hua, X.-M., Hu, H., Xia, S.-L., Hu, N., Kita, H. (2016). Application of a mordenite membrane to the esterification of acetic acid and alcohol using sulfuric acid catalyst. *Microporous and Mesoporous Materials*, 233, 171–176.
- [22] Sert, E., & Atalay, F. S. (2014). n-Butyl acrylate production by esterification of acrylic acid with n-butanol combined with pervaporation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 81, 41–47.
- [23] Parulekar, S. J. (2007). Analysis of pervaporation-aided esterification of organic acids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(25), 8490–8504.
- [24] Peters, T. A., Benes, N. E., & Keurentjes, J. T. F. (2005). Zeolite-coated ceramic pervaporation membranes; pervaporation–esterification coupling and reactor evaluation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(25), 9490–9496.
- [25] Figueiredo, K. C. de S., Salim, V. M. M., & Borges, C. P. (2008). Synthesis and characterization of a catalytic membrane for pervaporation-assisted esterification reactors. *Catalysis Today*, 133-135, 809–814.
- [26] Dooos, B. M. L., Vankelecom, I. F. J., & Jacobs, P. A. (2006). Aspects of immobilisation of catalysts on polymeric supports. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 348(12-13), 1413–1446.
- [27] Shaban, H. I. (1998). Hydrolysis of ethyl acetate:a pervaporation study. *European Polymer Journal*, 34(7), 955–973.
- [28] Nandiwale, K. Y., Sonar, S. K., Niphadkar, P. S., Joshi, P. N., Deshpande, S. S., Patil, V. S., & Bokade, V. V. (2013). Catalytic upgrading of renewable levulinic acid to ethyl levulinate biodiesel using dodecatungstophosphoric acid supported on desilicated H-ZSM-5 as catalyst. *Applied Catalysis A: General*, 460-461, 90–98.

- [29] Fernandes, D. R., Rocha, A. S., Mai, E. F., Mota, C. J. A., & Teixeira da Silva, V. (2012). Levulinic acid esterification with ethanol to ethyl levulinate production over solid acid catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 425-426, 199–204.
- [30] Kuwahara, Y., Fujitani, T., & Yamashita, H. (2014). Esterification of levulinic acid with ethanol over sulfated mesoporous zirconosilicates: Influences of the preparation conditions on the structural properties and catalytic performances. *Catalysis Today*, 237, 18–28.
- [31] Omota, F., Dimian, A. ., & Blik, A. (2003). Fatty acid esterification by reactive distillation: Part 2—kinetics-based design for sulphated zirconia catalysts. *Chemical Engineering Science*, 58(14), 3175–3185.
- [32] Zatta, L., Gardolinski, J. E. F. da C., & Wypych, F. (2011). Raw halloysite as reusable heterogeneous catalyst for esterification of lauric acid. *Applied Clay Science*, 51(1-2), 165–169.
- [33] Unlu, D., & Durmaz Hilmioglu, N. (2016). Synthesis of Ethyl Levulinate as a Fuel Bioadditive by a Novel Catalytically Active Pervaporation Membrane. *Energy & Fuels*, 30(4), 2997–3003.
- [34] Rezac, M.E. (2000). *Catalytic Membrane Reactors. Encyclopedia of Separation Science 1st ed.* Academic Press, Germany, 1676-1682.
- [35] Chopade, S.P., Mahajani, S.M. (2000). *Pervaporation: Membrane Separations. Encyclopedia of Separation Science, 1st ed.* Academic Press, Germany, 3636-3638.
- [36] Zhu, Y., Xia, S., Liu, G., & Jin, W. (2010). Preparation of ceramic-supported poly(vinyl alcohol)–chitosan composite membranes and their applications in pervaporation dehydration of organic/water mixtures. *Journal of Membrane Science*, 349(1-2), 341–348.
- [37] Feng, X., & Huang, R. Y. M. (1997). Liquid separation by membrane pervaporation: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(4), 1048–1066.
- [38] Solak, E.K. (2005). *Separation of dimethylformamide-water mixtures using sodium alginate, sodium alginate/poly(vinyl pyrrolidone) and N-vinyl-2-pyrrolidone-g-sodium alginate membranes*, Phd Thesis, Gazi University, Institute of Science and Technology, Ankara.
- [39] Brüschke, H.E.A., Wynn, N.P. (2000). Membrane Separations/Pervaporation. *Encyclopedia of Separation Science*, Academic Press, Germany, 1776-1778.
- [40] Doğan, H. (2007). *Zeolite filled polimeric membranes for pervaporation applications*, Phd Thesis, Kocaeli University, Institute of Science and Technology, Kocaeli.
- [41] Ceia, T. F., Silva, A. G., Ribeiro, C. S., Pinto, J. V., Casimiro, M. H., Ramos, A. M., & Vital, J. (2014). PVA composite catalytic membranes for hyacinth flavour synthesis in a pervaporation membrane reactor. *Catalysis Today*, 236, 98–107.
- [42] Unlu, D., & Hilmioglu, N. D. (2016). Pervaporation catalytic membrane reactor study for the production of ethyl acetate using $Zr(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ coated chitosan membrane. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 91(1), 122–130.
- [43] Xu, W., Xu, J., Gao, L., & Xiao, G. (2015). Preparation and characterization of inorganic acid catalytic membrane for biodiesel production from oleic acid. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 10(6), 851–857.
- [44] Assabumrungrat, S., Phongpatthanapanich, J., Praserttham, P., Tagawa, T., & Goto, S. (2003). Theoretical study on the synthesis of methyl acetate from methanol and acetic acid in pervaporation membrane reactors: effect of continuous-flow modes. *Chemical Engineering Journal*, 95(1-3), 57–65.

- [45] Buonomenna, M. G., Choi, S. H., & Drioli, E. (2010). Catalysis in polymeric membrane reactors: the membrane role. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 5(1), 26–34.
- [46] Zhang, F. (2012). *Development and scale-up of enhanced polymeric membrane reactor systems for organic synthesis*. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan.
- [47] Li, J., Chen, X., Qi, B., Luo, J., Zhuang, X., Su, Y., & Wan, Y. (2013). Continuous acetone–butanol–ethanol (abe) fermentation with in situ solvent recovery by silicalite-1 filled pdms/pan composite membrane. *Energy & Fuels*, 28(1), 555–562.
- [48] Nunes, S.P. & Peinemann, K.V. (2006). *Membrane Technology in the Chemical Industry*, Wiley, Germany, 354 pp.
- [49] Sun, H., Sun, D., Shi, X., Li, B., Yue, D., Xiao, R., Ren, P., Zhang, J. (2020). PVA/SO₄²⁻-AAO difunctional catalytic-pervaporation membranes: Preparation and characterization. *Separation and Purification Technology*, 241, 116739.
- [50] Li, M., Zhang, W., Zhou, S., & Zhao, Y. (2020). Preparation of poly (vinyl alcohol)/palygorskite-poly (ionic liquids) hybrid catalytic membranes to facilitate esterification. *Separation and Purification Technology*, 230, 115746.
- [51] Cao, Z., Xia, C., Jia, W., Qing, W., & Zhang, W. (2020). Enhancing bioethanol productivity by a yeast-immobilized catalytically active membrane in a fermentation-pervaporation coupling process. *Journal of Membrane Science*, 595, 117485.
- [52] Li, Y., Han, S., Zhang, L., Li, W., & Xing, W. (2019). Fabrication and modeling of catalytic membrane for removing water in esterification. *Journal of Membrane Science*, 579, 120–130.
- [53] Zhang, L., Li, Y., Liu, Q., Li, W., & Xing, W. (2019). Fabrication of ionic liquids-functionalized PVA catalytic composite membranes to enhance esterification by pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 584, 268-281.
- [54] Unlu, D., & Durmaz Hilmioglu, N. (2019). Production Of Fuel Bioadditive “Triacetin” by using phosphomolybdic acid loaded pva membrane in pervaporation catalytic membrane reactor. *Energy & Fuels*, 33, 2208–2218.
- [55] Unlu, D., & Hilmioglu, N. D. (2018). Pervaporation catalytic membrane reactor application over functional chitosan membrane. *Journal of Membrane Science*, 559, 138–147.
- [56] Unlu, D., Ilgen, O., & Durmaz Hilmioglu, N. (2017). Reactive separation system for effective upgrade of levulinic acid into ethyl levulinate. *Chemical Engineering Research and Design*, 118, 248–258.
- [57] Nigiz, F. U., & Hilmioglu, N. D. (2016). Simultaneous separation performance of a catalytic membrane reactor for ethyl lactate production by using boric acid coated carboxymethyl cellulose membrane. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 118(2), 557–575.
- [58] Nigiz, F. U., & Hilmioglu, N. D. (2016). Rhizomucor miehei lipase-immobilized sodium alginate membrane preparation and usage in a pervaporation biocatalytic membrane reactor. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 30, 381–391.
- [59] Qing, W., Wu, J., Chen, N., Liu, L., Deng, Y., & Zhang, W. (2017). A genuine in-situ water removal at a molecular lever by an enhanced esterification-pervaporation coupling in a catalytically active membrane reactor. *Chemical Engineering Journal*, 323, 434–443.

- [60] Zhang, W., Qing, W., Chen, N., Ren, Z., Chen, J., & Sun, W. (2014). Enhancement of esterification conversion using novel composite catalytically active pervaporation membranes. *Journal of Membrane Science*, 451, 285–292.
- [61] Zhang, W., Qing, W., Ren, Z., Li, W., & Chen, J. (2014). Lipase immobilized catalytically active membrane for synthesis of lauryl stearate in a pervaporation membrane reactor. *Bioresource Technology*, 172, 16–21.
- [62] Liu, Q. (2002). Modeling of esterification of acetic acid with n-butanol in the presence of $Zr(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ coupled pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 196(2), 171–178.
- [63] Yushan Zhu, & Hongfang Chen. (1998). Pervaporation separation and pervaporation-esterification coupling using crosslinked PVA composite catalytic membranes on porous ceramic plate. *Journal of Membrane Science*, 138(1), 123–134.
- [64] Ma, X.-H., Wen, X., Gu, S.-W., Xu, Z.-L., & Zhang, J.-L. (2013). Preparation and characterization of catalytic TiO_2 -SPPEK-PES nanocomposite membranes and kinetics analysis in esterification. *Journal of Membrane Science*, 430, 62–69.
- [65] Peters, T. A., Benes, N. E., & Keurentjes, J. T. F. (2007). Preparation of Amberlyst-coated pervaporation membranes and their application in the esterification of acetic acid and butanol. *Applied Catalysis A: General*, 317(1), 113–119.
- [66] Peters, T. A., van der Tuin, J., Houssin, C., Vorstman, M. A. G., Benes, N. E., Vroon, Z. A. E. P., ... Keurentjes, J. T. F. (2005). Preparation of zeolite-coated pervaporation membranes for the integration of reaction and separation. *Catalysis Today*, 104(2-4), 288–295.
- [67] Liu, Q., Jia, P., & Chen, H. (1999). Study on catalytic membranes of H3PW12O40 entrapped in PVA. *Journal of Membrane Science*, 159(1-2), 233–241.
- [68] Figueiredo, K. C. de S., Salim, V. M. M., & Borges, C. P. (2008). Synthesis and characterization of a catalytic membrane for pervaporation-assisted esterification reactors. *Catalysis Today*, 133-135, 809–814.
- [69] Bagnell, L., Cavell, K., Hodges, A. M., Mau, A. W.-H., & Seen, A. J. 1993. The use of catalytically active pervaporation membranes in esterification reactions to simultaneously increase product yield, membrane permselectivity and flux. *Journal of Membrane Science*, 85(3), 291–299.
- [70] David, M. O., Nguyen, Q. T., & Néel, J. (1992). Pervaporation membranes endowed with catalytic properties, based on polymer blends. *Journal of Membrane Science*, 73(2-3), 129–141.

Derleme Makalesi - Review Article

HVDC Güç İletim Sistemleri Konusunda Bir Derleme

Mahir Kutay^{1*}, Ahmad Mustapha Usman²

Geliş / Received: 25/02/2020

Revize / Revised: 20/07/2020

Kabul / Accepted: 21/07/2020

ÖZ

Elektrik enerjisi, dünya çapında “Alternatif Akım” (AC) olarak üretilir ve taşınır. Bununla birlikte, “Doğru Akım” (DC) güç iletiminin AC'den daha üstün olduğu bazı uygulamalar vardır. DC'den AC'ye ve AC'den DC'ye dönüşümler için iyi bir kontrol ve düzenleme sağlayan teknoloji eksikliğinden kaynaklanan sorunlar nedeniyle, DC güç iletim teknolojisi yaygınlaşmamıştır. Güç elektroniği cihazlarının geliştirilmesi, “Yüksek Gerilim Doğru Akım” (HVDC) güç aktarımındaki kısıtlamaların büyük bir kısmını kaldırmıştır. HVDC kullanımı, ekonomik faydaları ve “Yüksek Gerilim Alternatif Akım” (HVAC) güç aktarımına göre teknik avantajları nedeniyle uzun bir süredir günlük kullanımın bir parçası olmuştur. HVDC uzun mesafelerde güç aktarımında kayıpların azaltılması ve farklı frekanslarda çalışan ülkelerin güç sistemlerini birbirine bağlamasında HVAC'ye göre daha avantajlıdır. Bu makalede HVDC ilkeleri tanıtılmakta, HVDC'nin dünyadaki uygulamaları karşılaştırılmakta ve bu teknolojiye gelecekte ihtiyaç duyulacak gelişmeler tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler- HVDC, Tristör, IGBT, Tek kutuplu HVDC

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: mahir.kutay@yasar.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7572-4511>)

Uygulamalı Bilimler Yüksek Okulu, Yaşar Üniversitesi, Bornova/İzmir

²İletişim: ahmadusmanmustapha@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1753-516X>)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yaşar Üniversitesi, Bornova/İzmir

A Survey on HVDC Power Transmission Systems

ABSTRACT

Electric power is generated and transported globally by the means of an “Alternating Current” (AC) process. However, there are some applications in which “Direct Current” (DC) power transmission is superior to AC. Problems due to the lack of technology that provides good control and regulation for conversions of DC-to-AC and AC-to-DC hampered deployment of DC power transmission technology. The development of power electronic devices has removed a large portion of restrictions on “High Voltage Direct Current” (HVDC) power transportation. HVDC use has become part of daily use for a long time due to its economic benefits and technical advantages over the “High Voltage Alternating Current” (HVAC) power transmission. The advantages of HVDC make it suitable for power transmission over long distances and for connecting power systems of countries operating at different frequencies. This paper introduces the principles of HVDC, compares the applications of HVDC in the world, and discusses the future improvements needed within this technology.

Keywords: *HVDC, Thyristor, IGBT, Monopolar HVDC*

I. INTRODUCTION

Electricity is generated and transmitted as AC all over the world. During the 19th and the 20th centuries, HVAC transmission was kept as the dominant power transmission technology. As the power generation and transmission capacity increased, several important problems for HVAC systems emerged. Increasing the transmission capacity and range of undersea cables, to transport a vast amount of hydropower from remote locations to load centers over very long distances were the major challenges. During the 1920s, it was recognized that HVDC could be an efficient solution for both cases. Towards the end of the 1920s, mercury arc rectifiers were invented, but they could not be adapted to HVDC applications because of performance and capacity problems. The first application of mercury arc rectifiers to a commercial project became operational in 1954. This year, the first HVDC undersea power transmission line commissioned in Gotland (Sweden) [1]. In 1957, semiconductor thyristor developed as an alternative to mercury arc rectifiers. During the first half of the 1960s, thyristor technology evolved, and the high-voltage thyristor attracted the interest of the industry. In the spring of 1967, mercury-arc rectifiers used in the Gotland (Sweden) HVDC link was replaced by thyristors. It was the first time application of thyristors taken into commercial operation for HVDC transmission [2]. Nowadays HVDC lines used globally to transmit a large amount of power from the production site to the consumption areas over long distances [3]. The main reason is that HVDC is more effective than AC transmissions in all aspects of power system transmissions due to the fewer losses. Some applications of HVDC like undersea power transmission and facilitation of power transmissions between neighbor countries that use different AC frequencies are superior to HVAC.

II. HVDC FUNDAMENTALS

HVDC is a process by the use of high voltage generation and direct current, a huge amount of power picked up from one remote location to transport over the electrical power system. High voltage helps us in terms of a reduction process in the losses through transmission lines. Therefore, if the voltage stepped up at higher levels, it will have a smaller amount of current, and therefore a huge reduction in the electrical losses will be achieved [4]. This is the force behind the higher level of the voltage in HVDC. In countries, such as India and China, HVDC is the safest and the most economical way of transporting power over long distances. [5], [6].

A. Main Components of the HVDC Systems

The main components in the HVDC systems circuit listed as follows [7,8,9]:

- Converter Station: This is the main station where the use and functions of the rectifiers and inverters used for the AC-DC conversion process.
- Smoothing Reactors: The main functions of this reactor smoothing is that it exhibits the process of taking away or removing any existing AC components that were available or present in the HVDC systems.
- Filters: The importance of using the filter in this process is to remove any unwanted signal distortion in the process of using the AC and DC systems.
- DC interconnections.
- Circuit Breakers: They clear any abnormalities in the transformer and in the DC circuits.

B. HVDC Limitations

The factors to be considered in the field of HVDC are the switching, conversion, and control. The limitations are listed below:

- Reactive power is needed in a large amounts because the switching and the conversion generate an unwanted signal/disturbances in the systems, which in turn require the use of AC and DC filters.
- Converters are very costly.
- Change in the voltage level cannot be easily controlled by the use of transformers.

- Multi-terminal operations are very difficult.
- The manufacturing process of the HVDC circuit breakers is very complex.

III. HVDC APPLICATIONS

HVDC can all be used into the following categories of class according to [3,7,8]:

- Interlinking of the Power Grids:

Connections of AC grids carried out by the purpose of its stability and the energy flow. In the case of any challenge, the linking has to be carried out by the HVDC. For example, any connection that involves the use of two different frequencies and voltage, AC connection is not possible in this situation.

- Connecting DC Links in an AC Grid:

HVDC links can be used within an AC grid under some certain conditions, such as the load's demand and occurrences of an unwanted disturbance in the power system.

- Underwater Power Transmission:

The first implementation of HVDC is undersea power transportation. Today, many approaches of HVDC power transportation are used in the world. HVDC serves loads on islands with the use of marine transmission cables.

IV. HVDC NETWORK CONFIGURATIONS

HVDC network configurations can be classified as follows:

- Mono-polar lines
- Bipolar lines
- Homo-polar lines
- Back to Backlines

A. Mono-polar HVDC Lines

Mono-polar configuration is the most common configuration. As its name implies, this type of HVDC lines are constructed with only one negative polarity. Since corona effect of negative polarity is less compared with positive polarity, mono-polar lines are operated at the negative polarity [10,11]. The ground is functioning as the returning way. Mono-polar HVDC network connection layout is given in Figure 1.

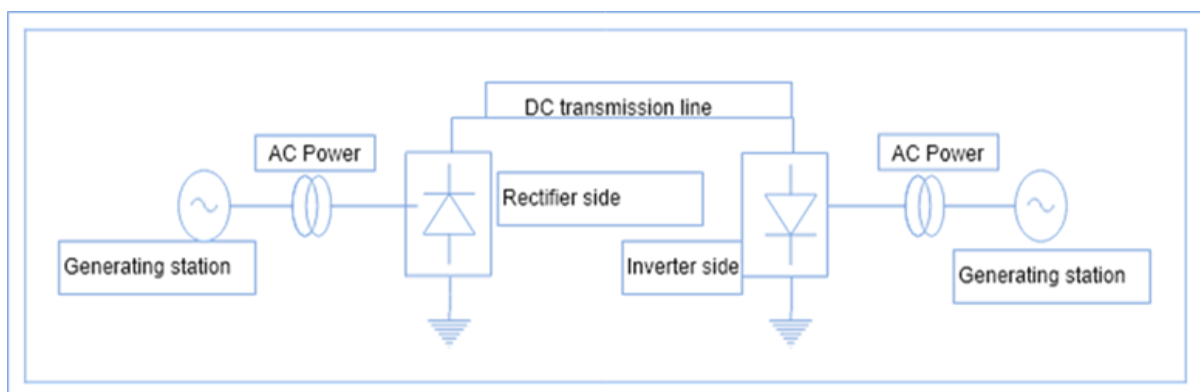


Figure 1. Mono-polar HVDC Lines

B. Bipolar line Configuration

The bipolar have two polarities of conductors which show the presence of both the positive and negative polarities in the systems. These two polarities of the conducting parts are arranged in the series of manner and operate at equal amount of voltage. As shown in Figure 2, the intersection of the converters grounded at one of the end or at both of the ends shown [12,13].

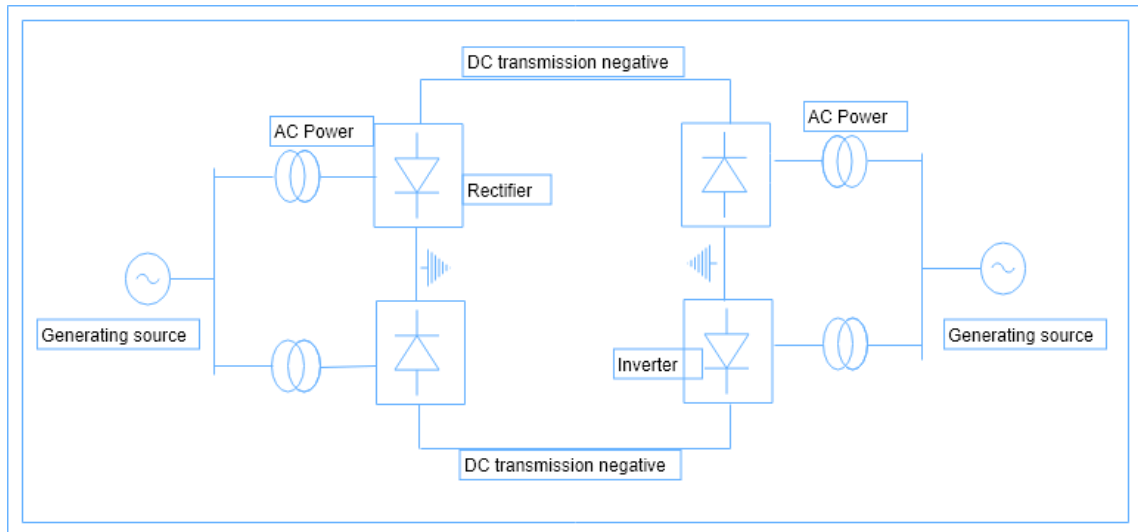


Figure 2. Bipolar HVDC System

C. Homopolar HVDC System

The homo-polar lines, as the name also goes by it means a type of HVDC system that contain more than two conductors having the same polarity, but they are in different form of the bipolar lines, and they always have earth as their path of return conductors, in which there mode of arrangement process is in the parallel manner as shown in Figure 3 [15].

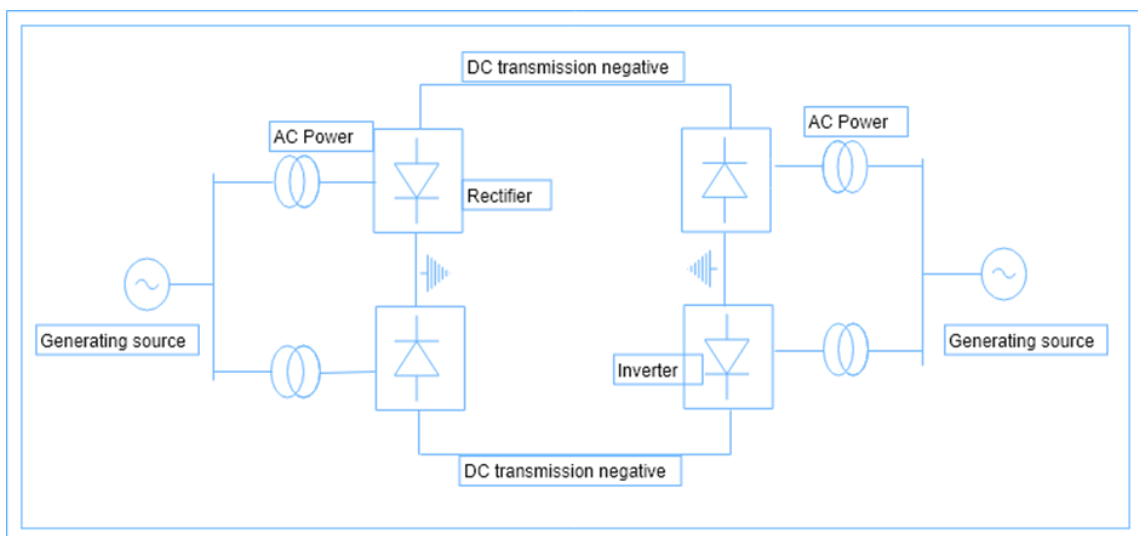


Figure 3. Homo-polar HVDC System

D. Back-to-Back Lines

A back-to-back HVDC connection is preferred when two different AC frequency systems are to be interconnected or for AC power system stabilization. HVDC back-to-back station does not contain overhead lines or cables for connecting the rectifier and the inverter. Therefore, DC transmission losses are negligible and DC voltage level is low, but the DC current amount is high.

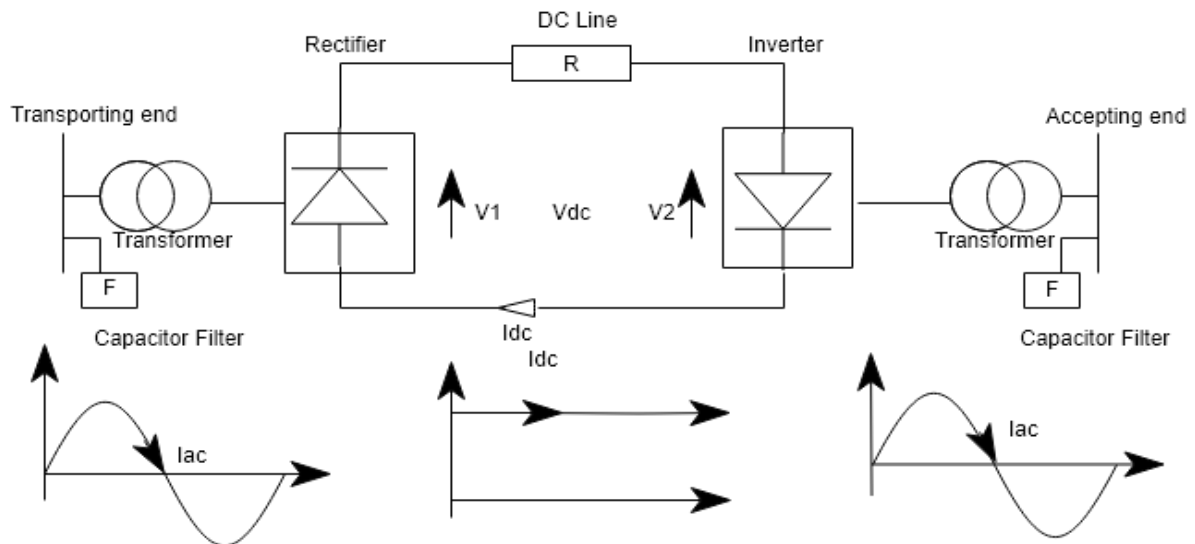


Figure 4. Back to back HVDC Lines

1) *Multi-Terminal Direct Current Lines System (MTDC)*: This arrangement consists of three converters DC connection cables. Some of the converters function as a rectifier while the other functions as an inverter. This type of MTDC connection is shown in Figure 4. The AC power created by the use of power plant, such as the wind farm is transformed into DC by a rectifier and transported to two inverters by cables. Inverters again convert DC into AC feeding two transmission lines [16].

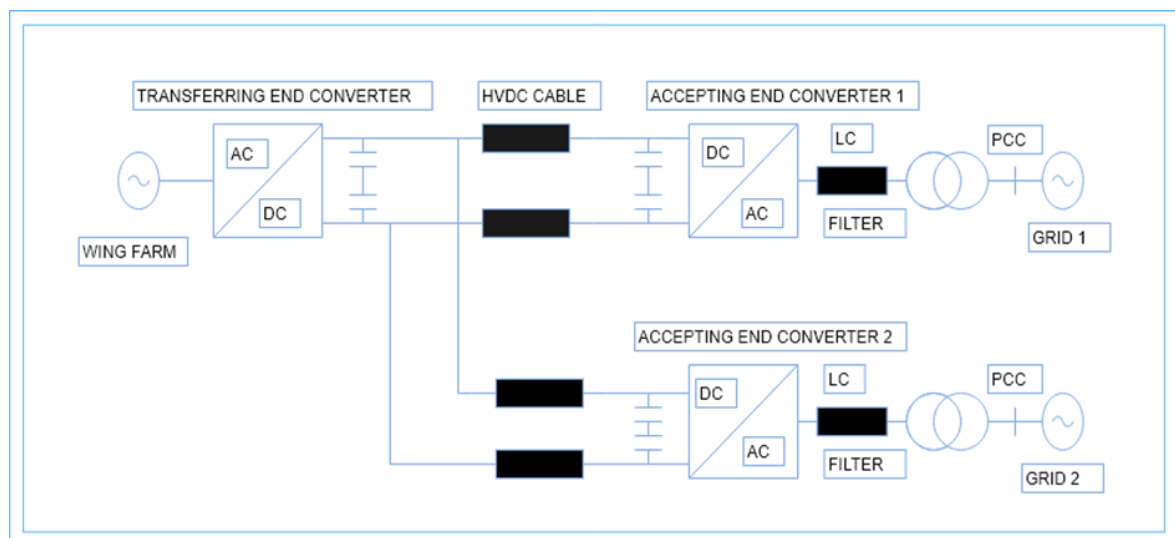


Figure 5.The MTDC Circuit Diagram

2) Types of MTDC Arrangements:

- Series MTDC lines system: In the series arrangement MTDC networks, the converters are arranged in a series of manner as shown in Figure 5.

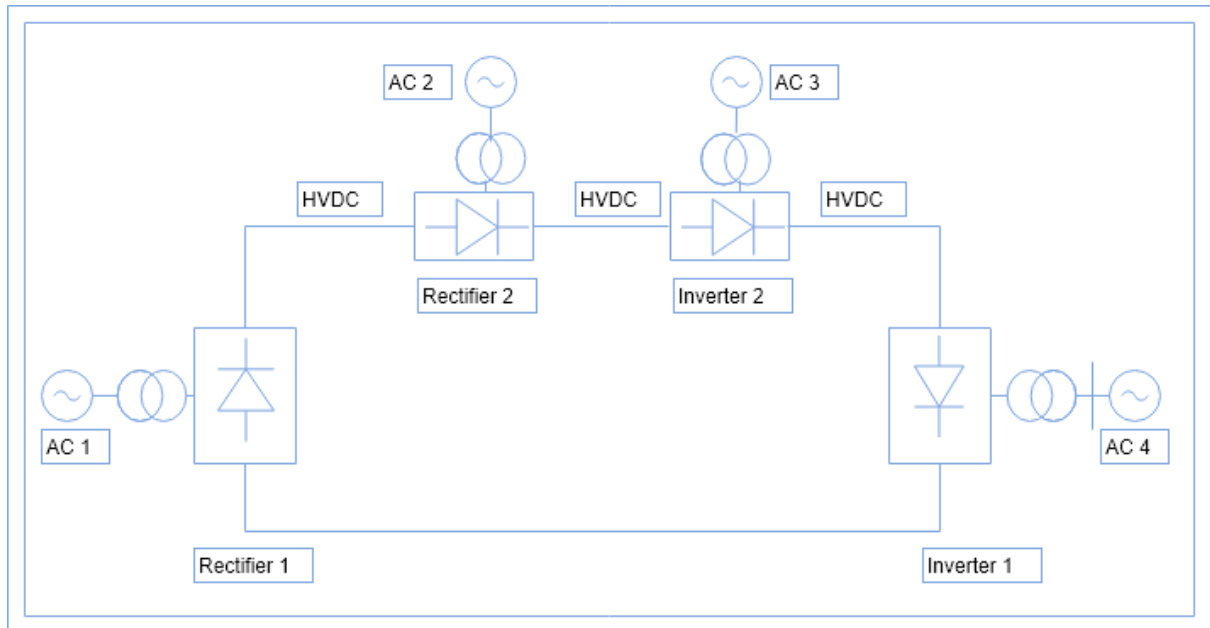


Figure 6. Series MTDC connections

- Parallel MTDC lines systems: The parallel arrangement for the MTDC networks, the converters connected in opposite to each other as shown in Figure 6.

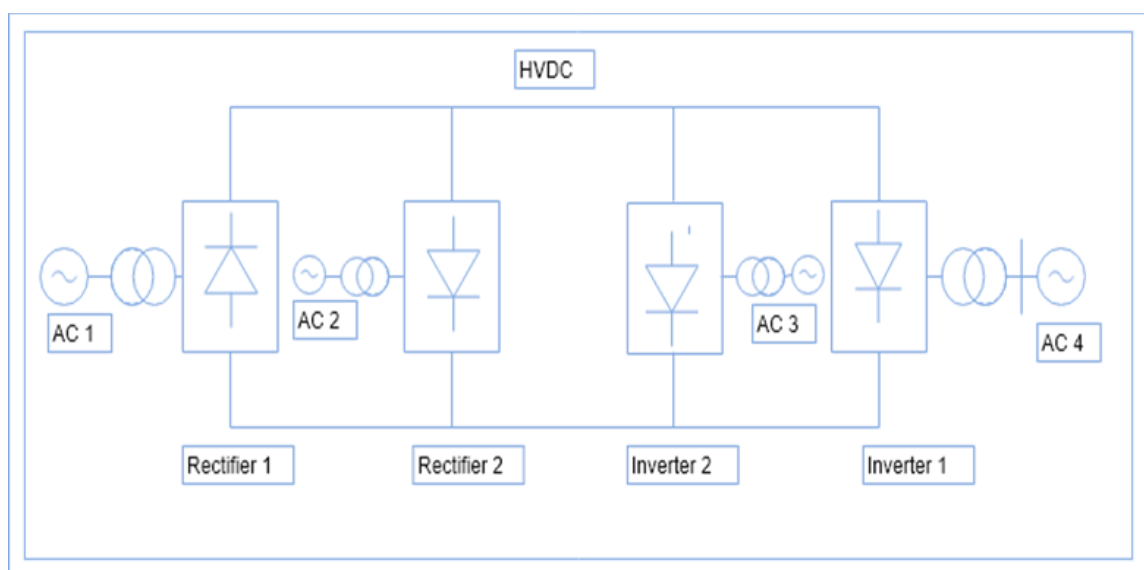


Figure 7. Parallel MTDC connections

V. COMPARISON of HVDC and HVAC in TERMS of COST

AC is widely used for a short range of distances mostly for domestic purposes, such as the residential, commercial, and industrial purposes. The AC transmission in short range costs less voltage and frequency controlled easily. The use of AC for a huge project is problematic. Voltage and frequency control tends to be very difficult and additionally, it has limitations. DC does not have any limitations attached to it and requires less investment cost. DC transmissions do not require too much use of conductor, unlike the AC systems. The use of both AC and DC transmission have been in use recently due to how we can both use them in transporting an electrical power from one far away location to the other by the means of converters, such as the rectifier and inverter [17-20]. Figure 7 shows the investment cost of both AC and DC transmission.

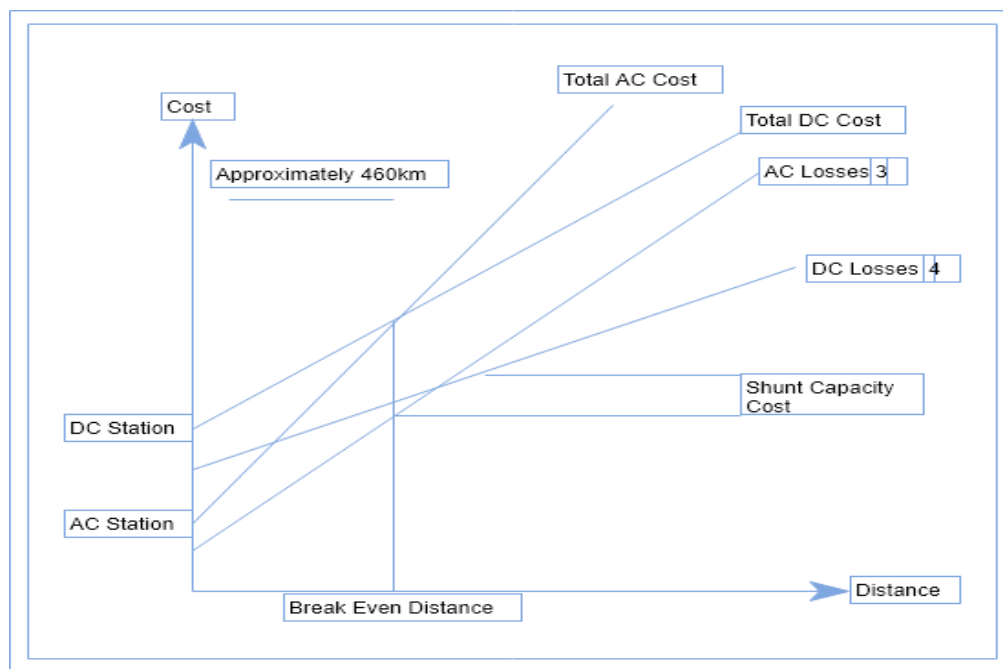


Figure 8. Investment cost comparison for AC and DC transmissions.

From the above graph, it can be concluded that there will be difficulties in realizing the cost reduction in the usage of transformers that have been working hand in hand with any AC transmissions process due to the a lot of progression that has been put forward into the creation of new devices that may be able to function between the converters.

A. Commercial Development of HVDC in the World

In the year 1954 the first commercial business of the HVDC started in Gotland [21]. Created in the Baltic water ocean between the two countries of Swedish terrain and Gotland island, the undertaking comprised in the exchange of intensity produced from Gotland island twist stop to the principle arrive [21]. This task was a big step to improve the idea of DC transmission technology. The outcomes were the presentation of thyristors in the 1960s.

As it can be seen from Tab.1.1, there are a few HVDC thyristor-based transmission systems all around the globe. They developed for the long transmission from the generation control point, for the most part, hydropower plant, to load centers.

In mainland Europe, the principal venture of association among England and France began in 1961 with the link generation of Lydd atomic power station in Great Britain to the French station at Schengen inverter station [22]. Worked at volt-generation of 100 kV and 800 An, it was a bipolar cable 64km long. It was later in 1981,

supplanted by two new 72 Km bipolar submarine cables working at 270 KV with influence exchange ability of 2000 Megawatts [23].

The Italian HVDC transmission connecting Sardinia, Corsica to Italy went in the task in 1965. Consisting of submarines cables of 103 km connecting Italy to Corsica and 15 km connecting Sardinia to Corsica, the system is a multipoint system that encourages generating energy trade among the numerous few static invertors dispersed between Italy, Corsica, and Sardinia. It has likewise three overhead lines, one on every locale: Italy territory, Corsica, and Sardinia with a length of 50 km, 167 km and 87 km individually. This establishment working at 200kV has control exchange ability of 200 MW [24].

In Japan 1960, numerous HVDC transmission systems worked to interconnect distinctive archipelagos. In 1965, Japan eastern and western systems were interconnected through Sakuma HVDC convertor station. The station has control limit of 300 MW. After five years in 1970, two new convertors were placed in administration, with 37.5 MW, 125 kV, at Sakuma testing station. The introduced convertors were thyristor-based [25].

Table 1. HVDC Projects in the world.

Project	Power MW	Distance KM	Voltage +/- KV
Azura-Edo Nigeria	1930	1920	550
Inga- Shaba, Congo	560	1700	500
Nelson River Canada	4000	940	500
Itaipu Brazil	6300	790	600
Quebec- New England	2000	1480	450
Pacific Intertie USA	3000	1360	500
Geszuba- Shanghai	1200	1000	500
New Zealand	560	600	350
Skgenerationrrak Denmark	440	240	250/350
TSQ China	2000	800	500
Three Gorges- Guandong	3000	940	500

Table 1. HVDC Project in the world.

VI. POWER ELECTRONIC COMPONENTS USED FOR HVDC

Early use of “mercury arc valves” are now being substituted with the recent inventions of the new creation of thyristors based that are now the most common use in any HVDC projects in the world. During the usage of the “mercury arc valves” observed problems listed below:

- The higher cost is observed.
- Absence and lack of control.
- The higher cost of regular checking/maintenance.
- The use of very large land required.

Thyristor replaced the usage of mercury-arc converters because of the following reasons:

- There is a minimal loss of power.
- Shorter recovery to time.
- Higher reliability.
- Very small switching losses
- Longer life span.

- There is a greater presence of flexibility in the manufacturing process

The thyristor is operational when pulse is applied to the gate. Thyristor has three methods of working: Forward conducting mode, converse blocking mode, and forward blocking. It is in onward conducting stage until forward current results to becoming smaller to the threshold holding current. A thyristor circuit is not fully controllable [26-30].

Today's VSC (Voltage Source Converter) for HVDC replace thyristors by IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor). IGBTs are fully controllable, which means conduction stage stopped by gate control. The IGBT-based VSCs creates fewer input harmonics and also operates at a very large power factors. Therefore, the need for supplementary apparatus, such as input harmonic filterates and SVCs (Static Var Compensators) eliminated [31]. The symbol for IGBT given in Figure 8.

VII. CORONA DISCHARGE ON HVDC TRANSMISSION LINES

Corona is defined as a process whereby there is an emission in electrical that have been gotten by the process of ionization of an unstable fluid, such as the examples of Air being surrounded by an electrically charged conductor. Corona is one of the major setbacks that cause the loss of power on an HVDC transmission line as it makes it be less in terms of its economic value and also makes it unwanted. The emission or the process of giving out the corona are formed on the outer part of conducting materials due to the larger gatherings of an avalanche electrons [27-31]. Factors affecting the corona discharge summarized as follows:

- Distance between conductors
- Voltage level used in the transmission process.
- Atmospheric conditions.
- Conductor internal structure and size.

Problems created by corona discharge are given below:

- UV radiations
- Rays of light
- Sound when it is unbalanced in nature
- Acids and other technical factors

VIII. FUTURE DEVELOPMENT

The future development of the HVDC transportation process is of utmost concern and importance for the transimtion of an electrical power to which it lies into integration of its several composites/complex interlinking networks. The idea behind this transportation of the power is due to the considerable amount of lower cost/budget that is involved in the approach and also the benefits of it in order to detour a very large amount of AC networks use [32]. Many countries in the world will now tend to be in connection of sharing power to the near countries which will tend to need the invention of a new approach like the use "large power plants system" which has to be linked to the HVDC process in order to have a more reliable and efficient power system transportation as can be observed from countries like Brazil, China, and other countries [33]. Studies have also shown that in countries like Pakistan, the entire electrical power transportation network is of about 40 electrical grid, consisting of an entire length of an HVAC lines nearly 12000km in order to meet the requirement and satisfaction of its population needs. To have access to sufficient electrical power, it needs to create an electrical power of about 3-4MW per year and also with the help of applying the large power plant systems to its transmission processes.

IX. CONCLUSIONS

- The use of HVDC systems was very reliable due to the minimal losses that were associated with the mode and process of using because of the lower amount of currents presence in the process.

- It is very effective and dependable due to how it is being used in the process of moving clean energy sources from different places.
- There is also an unbalanced stability in the inverter systems.
- The most complex and difficult problems that were faced were the difficulties in the equipment conversions.
- Daily usage of HVDC systems is increasing day by day in the world.

REFERENCES

- [1] AnoopDhayani A. P. et al., (2015) Design and Performance Analysis of HVDC Transmission System Under Different Fault Conditions. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering & Telecommunications*. ISSN 2319 – 2518.Vol. 1, No. 2, July 2015.
- [2] Hossain Z., Hossain K., Hossain A., and Islam M., , “Performance analysis of a HVDC transmission system under steady state and faulted conditions”, *Telkonnika Indonesian journal of electrical engineering*, 12(8), pp. 5854-5860, 2014.
- [3] Benish K. Paily. Ph.D. (2015) HVDC Systems Fault Analysis Using Various Signal Processing Techniques. Dublin Institute of Technology Republic of Ireland.
- [4] Grant J., “Review of HVDC technology application and future prospects”. *Research Gate*, November, 2017.
- [5] Edison S., Pugazhendi S., and Raj M. K., “Review of fundamentals of HVDC transmissions”. August 2014.
- [6] Kim C. K., Sood V. K., Jang G. S., Lim S., and Lee S. J., HVDC Transmission power conversion applications in power systems, Wiley-IEEE Press, 2010.
- [7] Padiyar K.R., HVDC Power Transmission Systems, 2nd Edition, New Academic Science, 2011.
- [8] Eltamaly A. M., Sayed Y., and Elghaffar A. N., “ HVDC system operation and fault analysis”, *IJET* November, 2017.
- [9] Grid Tech Team, Applications for HVDC technologies, U.S department of energy, April, 2013.
- [10] Yu J., Karady G. G., “Applications of embedded HVDC in power system transmission”, *IEEE Power engineering and automation conference, PEAM*, 2013.
- [11] Chandra S., Singh P., Gupta K., “Analysis of HVDC power transmission line with unique power control room”, *IJSR*, ISSN:2319-7064, 2015.
- [12] Kamalapur G. D., “ HVDC transmission in india” *IEEE* 2014.
- [13] Zeng P., Zhou Q., Dai Q., “Study on the development and reliability of HVDC transmissions systems in China”, *IEEE International conference on power systems*, 2016.
- [14] Lidong Z, Lars D, “A novel method of mitigate commutation failures in HVDC Systems”, *Proceedings of international conference on power system technology*, 2002.
- [15] Horiuchi, T. & Kato, Y., “Japana prepares HVDC techniques to meet domestic need”, *Energy international*., 11(1), pp. 13-14, 1974.
- [16] Adamson, C. and Hingorani, N. G., HVDC power transmission, Garaway Ltd, 1960.

- [17] Meah K., Ula S., “Comparative evaluation of HVDC and HVAC transmission systems”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [18] Daware K., “HVDC vs HVAC transmissions”, retrieved December 17, 2018. From <https://www.electricaleasy.com/2016/02/hvdc-vs-hvac.html>.
- [19] Long W. F., Editor "Comparison of costs and benefits for DC and AC transmission", OAK Ridge national laboratory, ORNL-6204, Feb 1987.
- [20] Comparative evaluation of HVDC and HVAC transmission system, Conference paper, July 2007.
- [21] Axelson A., Knosh G., The Gotland HVDC light Project, 2001.
- [22] Goodrich, F. & Andersen, B., “The 2000 MW HVDC link between England and France”, Power engineering journal, March, 1(2), pp. 69-74., 1987.
- [23] Mazzoldi, F., Taisne, J., Martin, C. & Rowe, B., 1989. Adaption of the control equipment to permit 3-terminal operation of HVDC link between Sardinia, Corsica and mainland Italy. IEEE, Power Delivery, April, 4(2), pp. 1269-1274.
- [24] Franck C.M., “ HVDC circuit breaker: A review identifying the future research need for power delivery”, IEEE transactions on power delivery, 26(2), 2011.
- [25] Wadha, C.L, Electrical power systems sixth edition, New Age International Publishers, New Delhi, 2010.
- [26] Motto W. J., “Introduction to solid state power electronics”, February 1977
- [27] Arruda C, Lima A. C. S., ” Corona modeling in HVDC transmission lines based on a modified particle-in-cell approach”, Electric power systems research No:125, 2015.
- [28] Ogar V. N., L., Bendor S. A., James A. E., ” Analysis of a corona effects on hvdc transmission lines”, American journal of engineering research (AJER), 6(7), pp. 75-87, 2017
- [29] Retrieved December 22 2018 from: <https://circuitglobe.com/corona-effect.html>
- [30] khani K.A., Applications of High voltage DC transmissions, Retrieved December 22, 2018 from: <https://circuitglobe.com/corona-effect.html>.
- [31] William John motto, Jr: “HVDC Corona Space Charge Modeling and Measurement”, IEEE Transactions on power delivery, 26(4), pp. 2630-2637, 2011.
- [32] Breuer W, et al.: “Trends for future HVDC Applications”, Electric power supply industry, 2006.
- [33] Future of HVDC power grid in Europe, retrieved March 11, 2019. From <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/TGD-R3-HVDC-Power-Grid-Straka.pdf>.
- [34] Selvaraj E. et al., (2014) A Review on Fundamentals of HVDC Transmissions. Chennai, India

Derleme Makalesi - Review Article

Yüksek Basınç Uygulamasının Et ve Et Ürünlerinin Güvenliği ve Raf Ömrü Açısından Rolü

Cemalettin Sarıçoban^{1*}, Mahmood Shakir Mahmood², Rand Kadhim Bahr Al-Murjan³

Geliş / Received: 22/04/2020

Revize / Revised: 12/09/2020

Kabul / Accepted: 14/09/2020

ÖZ

Yüksek basınç (YB) ilk olarak 19. yüzyılın sonunda malzeme kimyası alanında tanıtılmıştır. Gıda endüstrisinde ilk yüksek basınç uygulaması ise Hite tarafından 1899'da süt ve meyve ürünlerini pastörize etmek için uygulanmıştır. Tüketicilerin, tükettikleri gıdaların besin değerinde kayıplar olmayacak şekilde işlenmiş gıdalara olan ilgisine paralel olarak gıda işleme ve muhafaza açısından yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Bunlardan biri de yüksek basınçlı gıdalara uygulanmasıdır. Yüksek basınçlı işleme, gıdaları birkaç dakika belirli bir sıcaklıkta 100 ila 600 MPa arasında yüksek bir basınç seviyesine maruz bırakmayı amaçlayan bir tekniktir. Yüksek Basınç (YB) uygulamaları, özellikle mikrobiyolojik inaktivasyon sağlamanın yanında gıdaların vitamin, mineral, tat, renk ve görünüşünde önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır. Bu nedenle, ısı işlem uygulamaları için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. YB uygulamaları sıvı gıdalara başarıyla uygulanabildiği gibi et ve et ürünleri gibi gıdalara da uygulanabilmektedir. Yüksek basınç, raf ömrünün büyük ölçüde, özellikle dilimleme ve paketlenme işlemleri sırasında iyi hijyen/üretim uygulamalarına bağlı olduğu hazır yemeklerde mikroorganizmaları etkisiz hale getirmenin uygun bir yoludur. Bu derlemede, et ve et ürünlerinin güvenliğini arttırmada ve raf ömrünü uzatmada yüksek basınçlı rolüne değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Et, Et Ürünleri, Raf Ömrü, Yüksek Basınç, Yüksek Hidrostatik Basınç

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: cscoban@selcuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9898-0884>)

Gıda Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, 42075 Konya

²İletişim: mahmoudshakir@yahoo.com (<https://orcid.org/0000-0003-2204-2490>)

Gıda Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, 42075 Konya

³İletişim: ranoosh_kb@yahoo.com (<https://orcid.org/0000-0001-9804-6768>)

Gıda Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, 42075 Konya

The Role of High-Pressure Application for the Safety and Shelf Life of Meat and Meat Products

ABSTRACT

High pressure (HP) was first introduced into the field of material chemistry at the end of the 19th century. The first high pressure application in the food industry was applied by Hite in 1899 to pasteurize milk and fruit products. New technologies are being developed in terms of food processing and preservation in line with the interest of consumers in processed foods in such a way that there is no loss in nutritional value of the food they consume. One of these is the application of high pressure to foods. High pressure processing is a technique aimed at exposing food to a high-pressure level between 100 and 600 MPa at a given temperature for a few minutes. In addition to providing microbiological inactivation, High Pressure (HP) applications do not cause a significant change in the vitamin, mineral, taste, colour, and appearance of foods. Therefore, it constitutes an important alternative for heat treatment applications. HP applications can be successfully applied to liquid foods as well as foods, such as meat and meat products. High pressure is a convenient way of neutralizing microorganisms in ready meals, where its shelf life is largely dependent on good hygiene / production practices, especially during slicing and packaging processes. In this review, the role of high pressure in increasing the safety and extending shelf life of meat and meat products is discussed.

Keywords- *Meat, Meat Products, Shelf Life, High Pressure, High Hydrostatic Pressure*

I. GİRİŞ

Yüksek basınç (YB) ilk olarak 19. yüzyılın sonunda malzeme kimyası alanında tanıtıldı. Gıda endüstrisinde ilk yüksek basınç uygulaması, Hite tarafından 1899'da süt ve meyve ürünlerini pastörize etmek için uygulandı [1]. Daha sonra bakteri sporlarının yüksek basınca dayanıklılığı konusunda araştırmalar yapıldı [2] ve 1946'da Amerikan fizikçi P.W.'ye özellikle yüksek basınçlı işlemlerin yürütülmesi için tasarlanmış hermetik bir gemi icat ettiği için Nobel Fizik Ödülü verildi [3]. Bu teknik ilk olarak 1980'lerin sonunda Japonya'da gıda endüstrisinde uygulandı. Paskalizasyon olarak da adlandırılan işlem; ürünün belirli bir süre ve sıcaklık için çok yüksek hidrostatik basınçta (YHB, 100-1000 MPa) tutulmasından oluşur. YHB işlemi, gıdalardaki patojenik ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların inaktivasyonunu sağladığı için, ısıl işlemlere alternatif, ısıl olmayan bir işlem olarak kabul edilir. Japonya'daki ilk uygulamasından bu yana, bu yeni teknoloji, teknolojik ve ticari yönden önemli bir gelişme kaydetmiştir. Günümüzde dünya genelinde 160'dan fazla endüstriyel gemi kullanılmaktadır. Ayrıca, et ürünlerinin yüksek basınçla işlenmesi, son yıllarda alınan çok sayıda patentin kanıtı gibi hızlı büyüyen bir sektördür.

Bu derlemede, et ve et ürünlerinin güvenliğini arttırmada ve raf ömrünü uzatmada yüksek basıncın rolü ele alınmıştır.

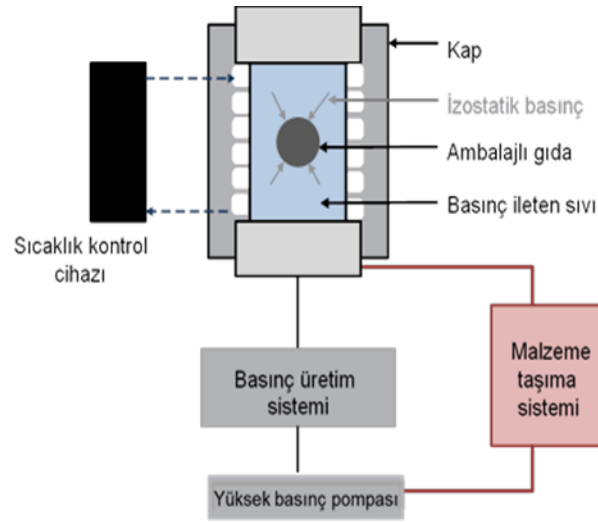
II. YÜKSEK BASINÇLI KORUMA TEORİSİ VE GIDALARIN DEKONTAMİNASYONUNDA ETKİ ŞEKLİ

Yüksek basınçlı işleme, gıdaları birkaç dakika belirli bir sıcaklıkta 100 ila 600 MPa arasında yüksek bir basınç seviyesine maruz bırakmayı amaçlayan bir tekniktir [4]. Bu teknoloji, basınç altındaki gıdaların davranışını belirleyen iki prensibe dayanmaktadır [5]. İlk olarak, reaksiyon dengesi üzerindeki etkilerin altında yatan önemli bir ilke, Le Chatelier'in prensibi olarak bilinir; buna göre, hacimdeki bir düşüşün neden olduğu etki, basınçla veya bunun tersi yönde bir artışla artırılabilir [6]. Bu nedenle, basıncın uygulanması fiziksel ve kimyasal değişikliklere (kimyasal reaktivite ve reaksiyon, moleküler konfigürasyonda değişiklik, faz geçişi) neden olur. Fiziksel olarak basınçtaki bir artış, moleküller arasındaki mesafenin azalmasına neden olur [7]. Yüksek basınçlı muamele sırasındaki fiziksel sıkıştırma, gıda kompozisyonuna bağlı olarak adyabatik ısıtma yoluyla, sıcaklıkta 100 MPa başına yaklaşık 3 °C'lik bir artışa neden olur [8]. Kimyasal değişimler minimumdur. Sadece hidrojen bağları, iyonik bağlar ve kovalent olmayan bağlar basınçla bozulur [9]. Basınç, mikrobiyal gelişmeyi önemli ölçüde etkiler. Gıdanın korunmasına katkıda bulunan mikrobiyal inaktivasyon aslında, hücre zarlarında basınca bağlı hasar, protein denatürasyonu, enzim aktivitesindeki değişiklikler ve ribozomun konformasyonu sonucu meydana gelir [10]. Ancak, basıncın gıda bileşenleri üzerinde de etkileri vardır. Dolayısıyla, protein denatürasyonu tekstürü, gıda kalitesi üzerinde olumlu veya olumsuz etkiler ile değiştirebilir. Kovalent bağlar basınçtan etkilenmediğinden, vitaminler ve lezzet verici bileşikler değişikliğe uğramaz [9]. Sonuç olarak, mikroorganizmalar yüksek basınçlı işlemlerle hedeflenirken, gıdaların besleyici ve duyuşal özellikleri geleneksel bir ısıl işleme kıyasla korunmaktadır.

Yüksek basınç etkisiyle ilişkili ikinci prensip, basıncın tüm ürün boyunca basınç gradyanı olmadan anında ve düzgün bir şekilde iletilmesini belirten izostatik prensiptir [10]. Böylece basınç, izostatik basınç olarak tanımlanır. Basınç, gıdanın boyutundan ve geometrisinden bağımsız olarak uygulanır, çünkü çekirdeğe basıncın aktarılması kütle veya zamana bağlı değildir [4]. Sonrasında, basınç uzaklaştırıldığında gıda orijinal haline döner.

Yüksek basınçlı cihaz; basınçlı bir akışkan, genellikle su, basınç üretim sistemi, malzeme taşıma sistemi ve sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak ürüne basıncın iletildiği bir kaptan oluşur (Şekil 1) [11].

Ürün ambalajı, basınca ve su direncine dayanacak şekilde esnek olmalıdır. Paketlenmiş gıdalar basınçlı kabın içerisine konulur. Hazne kapatılır ve hacim düşürülerek (doğrudan sıkıştırma) veya basınç ileten sıvıyı bir yüksek basınçlı pompa (dolaylı sıkıştırma) vasıtasıyla hazneye enjekte ederek basınç artırılır. Sıvı, istenen basınca ulaşıncaya kadar gıda etrafındaki havanın yerini değiştirir. Ardından, pompa durdurulur ve istenen basınç verilen süre boyunca korunur. İşlem tamamlandığında, atmosfer basıncına geri dönen, basınç ileten sıvının serbest bırakılmasıyla ambalaj sıkıştırılır. Basınçlı kap açılır ve paketlenmiş gıda çıkarılır [12].



Şekil 1. Yüksek basınçlı ekipman ilkesinin şeması [11].

Yüksek basınç verimini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bunlar; mikroorganizma türü, basınç kinetiği, sıcaklığın etkisi, ortamın kompozisyonu, pH ve su aktivitesidir [13].

III. ET ÜRÜNLERİNİN GÜVENLİĞİNİ ARTIRMAK İÇİN YÜKSEK BASINÇ UYGULAMASI

Et ve et ürünleri *Salmonella* spp., *Campylobacter jejuni/coli*, *Yersinia enterocolitica*, *Verotoxigenic Escherichia coli* (VTEC) ve belli bir yere kadar *L. monocytogenes* ile insan enfeksiyonlarının çoğunu barındırır. Sağlıklı hayvanların gastrointestinal kanalının bulunduğu bölgelerde, transformasyon, taşıma ve çapraz kontaminasyon yoluyla gıdalara aktarılır. Taze kırmızı ette *Salmonella* spp., *C. jejuni/coli*, *Y. enterocolitica* ve VTEC oluşumları; organizma, coğrafi faktörler, çiftçilik ve/veya et üretim uygulamaları gibi bir dizi faktöre bağlı olarak değişebilir [14]. Çoğu durumda hijyen göstergesi olarak kabul edilen *E. coli*, bazı çok patojenik serotipleri içerir. VTEC arasından *E. coli* O157:H7 böbrek yetmezliği gibi ciddi komplikasyonlara neden olabileceği için ciddi bir halk sağlığı riski oluşturabilir. Çalışmaların çoğu, *E. coli*, 16 °C'de marine edilmiş dana bonfile içinde 6 dakika boyunca 600 MPa tarafından ve 6 °C'de pişirilmiş ve ısıtılmış jambondan tamamen etkisiz hale getirilebildiğinden yüksek basınca duyarlı olduğunu göstermiştir [15, 16]. *E. coli* O157:H7 ayrıca 5 dakika boyunca 20 °C'de 700 MPa ve 5 dakika boyunca 19 °C'de 483 MPa'da, kuru fermente salamlarda ve çiğ kıyım etinde uygulanan işlemlerden sonra tamamen etkisiz hale getirildi [17, 18]. 500 MPa'nın altındaki yüksek basınç işlemlerinin *E. coli* ve *E. coli* O157:H7'nin inaktive edilmesinde etkisiz olduğu belirlenmiştir. Model et sistemi [19] ve sığır köftesi [20] üzerinde 400 MPa'da gerçekleştirilen muameleler, sırasıyla 4.5 (8 aşılınmış) ve 2.45 log₁₀ (7 aşılınmış) inaktivasyonuna yol açmıştır.

L. monocytogenes önemli bir halk sağlığı sorununu teşkil eder. Bu nedenle birçok çalışma, yüksek basınçın et ürünlerinde *L. monocytogenes*'in inaktive edilmesi üzerindeki etkisini ele almıştır [21-25]. *L. monocytogenes*'in buzdolabında gelişebilme özelliğinden dolayı YHB işlemlerinin, hayatta kalan hücrelerin soğutulmuş depolama sırasında tekrar gelişmesine izin vermeyecek kadar etkili olması gerektiği bilinmelidir. Gram-negatif bir bakteri olan *Salmonella*; kıyılmış tavukta, et örneğinde [26], fermente edilmiş [27] ve kanatlı sosislerinde [28] 400 MPa'dan itibaren yapılan YHB işlemleri [29] ile genellikle önemli ölçüde inaktive edildi.

Jofré ve ark. [24], gıda kaynaklı patojenlerden *L. monocytogenes*, *Salmonella enterica*, *S. aureus*, *Y. enterocolitica* ve *Campylobacter jejuni* ile hijyen göstergesi olan *E. coli* ve bozulmaya neden olan mikroorganizmalar (*Debaryomyces hansenii* ve LAB) ile yapılan testlerle, pişmiş ve ısıtılmış uygulanmadan kurutulmuş jambon ve marine edilmiş dana etinin güvenliğini arttırmak için yüksek basınçın kullanıldığını gözlemlemiştir [16]. 600 MPa'da uygulanan işlem; *E. coli*, mayalar ve gıda kaynaklı patojenlerden *L. monocytogenes*, *Salmonella*, *Y. enterocolitica* ve 3.5 log cfu/g'da aşılınan *C. jejuni*'nin etkin şekilde inaktivasyonunu sağlamıştır ve *Y. enterocolitica*'nın en az aktif olan ve 10 g üründe saptanmadığı bildirilmiştir.

Tamamen inaktivasyonun sağlandığı marine edilmiş dانا eti hariç tđm ũrđnler iēin 10 cfu/g'm altındaki *L. monocytogenes* ve *Salmonella* spp. konsantrasyonları bulunabilir. Bununla birlikte, *S. aureus*, diğer patojenik aŐılanmiŐ tđrler arasında YHB işlemine en direnēli mikroorganizmadır. Marine edilmiş siğır etinde en yđksek inaktivasyon (2.7 log₁₀ cfu/g) elde edilmiştir [16]. *S. aureus*'un yđksek basınēa karşı direnci diğer araştırmacılar tarafından da gđzlemlenmiŐtir.

IV. ET ũRĐNLERİNİN RAF ŐMRĐNŐ UZATMAK İēİN YĐKSEK BASINē UYGULAMASI

Yđksek basınē, raf Őmrđnđn bđyđk Őlēđde, Özellikle dilimleme ve paketleme işlemleri sırasında iyi hijyen/ũretim uygulamalarına bağlı olduğu, hazır yemeklerde mikroorganizmaları etkisiz hale getirmenin uygun bir yoludur. Bu nedenle, birēokēalıŐma, Özel sosislerin raf Őmrđnđn uzatmak iēin YHB uygulamasının kullanımı ile ilgilidir [28, 30]. Simonin ve ark. [13], YHB işlemleri kullanarak kuru-kũrlenmiŐ jambon [15, 16] ve sosisler [31], pişmiş jambon [15, 25] ve pişmiş sosisler vb. [32, 33] et ũrđnlerinin raf Őmrđnđn uzatmayı amaēlayan ēalıŐmalar yapmıştır.

Ette bozulmaya neden olan mikroorganizmalar esas olarak enterobakterler ve laktik asit bakterileri (LAB)'nden oluŐurken, dđŐđk sıcaklıktaki değişimler temelde psikrotroflara bağlıdır. Ette *Pseudomonas* tđrlerinin baskın olduğu psikrotrofların, yđksek basınēlara karşı mezofillerden daha duyarlı oldukları dđŐđnđlmektedir [13]. Bu nedenle, 300 ve 450 MPa'da yapılan ēalıŐmaların, *Pseudomonas*'ı [34, 35] tamamen etkisiz hale getirdiği gđsterilmiŐtir [35, 36]. 31 °C'de 6 dakika boyunca 600 MPa'da uygulanan yđksek basınēın, 4 °C'de 120 gđnlđk depolama sđresi boyunca kuru-kũrlenmiŐ ve pişmiş jambonda mayaları ve enterobakterleri tamamen etkisiz hale getirdiği gđrđlmüŐtir [15, 26]. Dolayısıyla, YHB işlemi bu iki floranın ũreme ve gaz ũretme potansiyelini azaltmada etkili olmuştur. Bununla birlikte, YHB işleminin LAB'yi inaktive etmesinin, et ũrđnlerinin doğal yapısına bağlı olduğu gđsterilmiŐtir. Her ne kadar 7 °C'de 20 dakika boyunca uygulanan 400 MPa'lık işlem dilimlenmiŐ-pişmiş jambonda LAB popđlasyonunda Önemli bir azalma sağlamış olsa da [37], sosis ũzerinde yapılan 15 °C'de 10 dakika boyunca 600 MPa'lık daha yđksek bir basınē işlemi, LAB sayısı ũzerinde neredeyse hiēbir etki yapmamıştır [38]. Aslında, kuru-kũrlenmiŐ ve marine edilmiş gıda ũrđnlerinde LAB'nin tamamen inaktive edilmesine olanak sağlamıştır, ancak 60 gđnlđk depolamada pişmiş et ũrđnlerinde yeniden gelişme gđzlenmiŐtir, bu da işlem gđrmemiŐ ve basınē uygulanan pişmiş et ũrđnlerine benzer bir son mikrobiyal yđke yol aēmıŐtır [15]. Jofrđ ve ark. [16], YHB işlemi, pişmiş jambonda LAB'nin kuru-kũrlenmiŐ jambondan daha fazla inaktive (4.6 ve 1.6 log₁₀) edilmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, muhtemelen bu ũrđnlerdeki dđŐđk miktar nedeniyle, kuru-kũrlenmiŐ ũrđnlerde soğukta depolama boyunca LAB yeniden ortaya çıkmamıŐtır, oysa 4 °C'deki 120 gđnlđk depolamanın sonunda basınēlı ve işlem gđrmemiŐ pişmiş ũrđnlerde LAB popđlasyonu aynı seviyeye ulaşmıştır [16].

İlginē bir Şekilde, yđksek basınē uygulaması her zaman hızlı mikrobiyal inaktivasyona yol aēmaz, fakat popđlasyonun azalmasını geciktirir. Bu, sosislerin *Pseudomonas* ve *Enterobacteria* iēin 15 °C'de 10 dakika boyunca 300-600 MPa ile muamelesinden sonra gđzlenmiŐtir, bu da YHB'den hemen sonra belirgin bir mikrobiyal azalmaya yol aēmazken, bakteriler ertesi gđn saptanamaz hale gelmiştir [38]. Öte yandan, 400 MPa ũzerindeki yđksek basınēın bakteri geri kazanımını etkilediği ve bakteri ũremesinin gecikmesine neden olduğu gđsterilmiŐtir [15, 16, 28]. Bununla birlikte, bazı durumlarda, YHB'den sonra bakteri ēođalması, yđksek basınētan sonra elde edilen hızlı mikrobiyal azalmanın yararlarını gđz ardı etmektedir. Garriga ve ark. [26] tarafından, suyla homojenize edilmiş-pişmiş-iŐlenmemiŐ 20 gđnden daha kısa bir sđre sonra basınē uygulanmış olan jambonun (10 dakika boyunca 17 °C'de 400 MPa) LAB ve *E. coli* popđlasyonu gđzlemlenmiŐtir. Geri kazanımın, gıda bileşenine ve Özellikle de atıkların [39] ya da yağın [31] varlığına, ũrđn hacmine [16] bağlı olduğu ve YHB işleminin Önce bir pişirme aŐamasının olması [15, 26], YHB işlemlerinin ardından mikrobiyal bđyđmeyi kontrol etmeyi dikkate almak Önemli Őzelliklerdir.

V. YĐKSEK BASINēLA UYARILAN ETİN MODİFİKASYONU

A. Yđksek Basınēın Et Tekstũrđ ũzerine Etkisi

İŞleme koşullarına, et bileşimine ve hazırlanmasına (ēiđ, pişmiş, kuru vb) bağlı olarak yđksek basınētan sonra ēok ēeŐitli dokusal değişiklikler gđzlenmiŐtir [40]. DđŐđk sıcaklıktaki yđksek basınēın, Őlđmden birkaç saat sonra uygulandığında eti yumuŐatabileēi kabul edilmiştir [40, 41]. Bununla birlikte, rigor mortis sonrası

uygulandığında, yüksek basıncın yumuşatma üzerindeki ters etkisi sıklıkla rapor edilmiştir [42]. Sonuç olarak, Sun ve Holley [42], yüksek basıncın iki temel etkisini, kas olgunlaşması, yani rigor mortis ve sıcaklık ile ilgili olarak, uygulama zamanının bir fonksiyonu olarak özetlemişlerdir. Basınç, rigor mortis öncesi et üzerine uygulandığında ette düşük basınçlı (< 200 MPa) işleminin yumuşatma etkisi gözlenirken, rigor mortis sonrası etin yumuşamasını sağlamak için daha yüksek sıcaklığın, yüksek basınçlı işlem ile birleştirilmesi gerekir. Rigor mortis sonrası sığır kasının [43] ve 400 MPa'da işlem gören tavuk kasının sertliğinde, yüksek basınçtan kaynaklanan bir artış gözlenmiştir [44, 45]. Benzer şekilde, 520 MPa'da uygulanan işlem, sığır kasının sertliğinin artmasına neden olmuştur [46]. Aksine, 8 °C'de 500 MPa'da yüksek basınçlı muameleden sonra sığır eti yumuşaklığında bir artış gözlenmiştir [47]. Bitkisel orijinli enzimler, etlerin çözünebilir proteinini kolayca hidrolize edebilir. Enzimatik katkılarla gevrekleştirme amacı enzimin bağ doku (kollagen ve elastin) üzerine etkisi ile gerçekleşmektedir [48]. Elastin üzerine etkili olan papain'in, sığır kasında 100 ila 300 MPa'a kadar yüksek basınçlı işlemden önce enjeksiyonunun, et sertliğinin artmasını önlediği bulunmuştur [49].

Jambon gibi işlenmiş et ürünlerinde de yüksek basınca bağlı sertlik gözlenmiştir. 6 dakika boyunca 15 °C'de 500 MPa'lık bir YHB muamelesi, 50 günlük depolama süresi boyunca yumuşamada bir azalmaya neden olmuştur [50]. 500 MPa ve 65 °C'de yüksek basınçla işlenmiş pişmiş sosisler, sertliğini kaybetmiş ve 40 dakika boyunca 80-85 °C'de ısıyla pişirilen pastörize edilmiş sosislere kıyasla daha düşük ağırlık kaybıyla birlikte yapışkanlık kazanmıştır [51]. Çiğ et üzerinde yapılan çalışmalar, pişirmeden önce yapıldığında yüksek basıncın, yalnızca pişmiş etlere kıyasla jel esnekliğini artırma eğiliminde olduğunu göstermiştir [52] ve pişirme kayıplarını azaltmıştır [53]. Yüksek basınç ve ısı işlemlerin birleştirilmesi, ısı kaynaklı protein denatürasyonu olarak et dokusunun değişken bir modifikasyonu ile sonuçlanmıştır. Genel olarak, yüksek basınçlı muamele sırasında sıcaklığın 70 °C'nin üzerine çıkarılması, daha düşük sertlik ve görünür elastikiyet [54] fakat daha yüksek yapışkanlık ile sonuçlanmıştır [55]. Çiğ devekuşu sosislerinin jeli, sıcaklık 40 °C'den 60°C'ye yükseldiğinde kuvvetlenmiş ve serbest su miktarı, ısı işlem arttıkça azalmıştır [56, 57]. Et hamurlarını 200 veya 400 MPa'da ve 70-80 °C'de işlemek, yalnızca pişmiş örneklerde bulunanlardan daha iyi yağ ve su tutulmasını sağlamıştır [58]. Ürün formülasyonunun ve örneğin tuz içeriğinin, et hamurlarında doku ve suyun tutulmasını etkilediği gösterilmiştir [52, 58]. Et dokusunun yüksek basınç uygulaması ile değiştirilmesinin altında yatan mekanizmalar, miyofibriller proteinlerinde depolimerizasyon, çözünme, denatürasyon ve agregasyondur [59, 60].

B. Yüksek Basıncın Etin Oksidasyonu Üzerine Etkisi

Birçok çalışma, kanatlı eti ve et ürünlerinde soğutarak depolama sırasında hemen [61] veya sonra uygulanan yüksek basınçlı işlemlerin ardından lipit oksidasyonunun gözlenebileceğini göstermiştir [62]. Lipit oksidasyonu, genellikle istenmeyen bir ransidite ve kötü lezzet oluşturması ile ilişkilidir. Bu nedenle, yüksek basınçlı işlemin potansiyel olarak bu zararlı özelliğine çok dikkat edilmiştir. Genel olarak, 300 MPa'nın altındaki yüksek basınç, lipit oksidasyonu üzerinde çok az etkiye sahiptir [13]. Bununla birlikte, ikincil oksidasyon ürünlerinin üretimi ile birlikte basınç seviyesiyle lipit oksidasyonunun arttığı gösterilmiştir. 600 MPa'nın üzerindeki basıncın, vakumla paketlenmiş tavuk göğüs kasında 10 günlük soğutulmuş depolamadan sonra lipit oksidasyonunu arttırdığı gösterilmiştir [63]. Beltran ve ark. [62] 500 MPa'da ve 50 °C'de 30 veya 60 dakika boyunca işlenen çiğ kıyılmış tavuk etlerinde lipit oksidasyonunun geciktirilmesine yardımcı olması için vakumlu ambalajın kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Nitekim, yüksek basınçlı işlem görmüş ürünlerdeki ransiditeyi en aza indirmek için önerilen bir strateji, N₂ ve CO₂ [64] veya vakumlu paketleme [65] ile modifiye atmosfer altında ambalaj kullanılmasıydı. Paket içerisindeki oksijen konsantrasyonu, soğutmalı depolama sırasında düşürüldüğünde lipit oksidasyonunu etkilemiştir, oysa yüksek basınçlı işlemin kendisinde herhangi bir etkisi olmadığı görülmüştür [66].

Yüksek basınçlı işlemden sonra et orijininin lipit oksidasyonuna duyarlılığı üzerindeki etkisi ile ilgili çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Ma ve ark. [67], tavuk kaslarının, 600 ve 800 MPa basınca maruz kaldıklarında, sığır kasından daha az lipit oksidasyonuna duyarlı olduğunu bildirmişlerdir. Öte yandan, Schindler ve ark. [68], sığır etinin tavuk etinden daha stabil olduğunu, 400 veya 600 MPa'a kadar yüksek basınçlı işlemlere dayanıklı olduğunu tespit etmişlerdir. Bu işlem oksijenle temas, homojenizasyon, öğütme, kıyma ve dilimleme gibi işlemlerle desteklenmekte, böylece oksidasyon genellikle yenilmeye hazır ürünlerinde artırılabilmektedir [62, 69]. Ürün formülasyonu da yüksek basınçla uyarılmış lipit oksidasyonunun hızlandırılmasında veya önlenmesinde önemli bir rol oynar. Öte yandan, antioksidan özelliklere sahip bazı katkı maddeleri lipit oksidasyonunu en aza indirebilir.

Yüksek basınçtan sonra ette oksidasyon hızlanmasının birçok nedeni belirtilmiştir: lipid oksidasyonunu katalize eden demir iyonlarının salınması [66, 70], çığ tavuk göğüs kasında membran hasarı [63] veya sığır köftesinde adipositlerin yırtılmasıdır [71].

C. Yüksek Basıncın Etin Rengi ve Duyusal Özellikleri Üzerine Etkisi

Et rengi, tüketicilerin satış noktasında ürünü satın almasını etkileyen önemli bir kalite kriteridir. Bununla birlikte, et rengini, özellikle de çığ kırmızı et rengini değiştirmek için yüksek basınçta gerek duyulduğu bilinmelidir. L^* , a^* , b^* renk skalasındaki Lightness (L^*) (Açıklık-koyuluk) bileşeninin, 200 MPa'nın üzerindeki basınçlarda, sırasıyla, tavuk, domuz ve sığır etinde arttığı bulunmuştur [44, 62, 72]. Bu beyazlatma etkisi, 1 dakika kadar kısa sürelerle yüksek basınçlı işlemlerden sonra ortaya çıkabilir [44, 73]. Bu durum, yapı ve yüzey özelliklerini etkileyen sarkoplazmik ve/veya myofibriller proteinlerinin çözünürlük kaybına neden olan protein koagülasyonu [71] ya da globin denatürasyonu ve heme grubunun yer değiştirmesi ya da serbest bırakılması [75] ile ilişkili olmuştur. Kırmızı indeksle ilişkilendirilen a^* renk bileşeninin, sığır etinde 350-400 MPa üzerindeki basınç işleminden sonra azaldığı da gösterilmiştir [72]. Bu azalma, ferröz miyoglobinin ferrik metmyoglobine oksidasyonuna [73, 76] ve muhtemelen kahverengimsi renkten sorumlu olan denatüre olmuş myoglobin ferrik türlerine bağlanmıştır [77]. Yüksek yağ içeriği (%20-25), özellikle sığır köftesi [71] ve domuz sosisinde, et rengi değişimini önemli ölçüde artırır [78]. Bununla birlikte, çığ et ürünlerinin çoğu zaman daha fazla pişirilmesi amaçlandığından, yüksek basınçta çığ et rengi üzerindeki zararlı etkileri genellikle engellenebilir [17, 51]. Bu nedenle, bu hususlar yalnızca "çığ benzeri" ürün olarak satılması amaçlanan ürünler için geçerli değildir [62, 73]. Kürlenmiş et ürünleri vb. yenilmeye hazır et ürünleri için, yüksek basınçta et rengini daha az oranda değiştirdiği gözlenmiştir [79, 80]. Ayrıca, yüksek basınçta bağlı et renginin değişmesi bazen depolama sırasında kaybolur [76]. Basınçlandırma öncesi ilave edilen ön pişirme ürünleri de renk değişikliğini azaltmada bir başka uygulama olabilir [74].

Yüksek basınçtan kaynaklanan renk, doku, aroma ve lezzet değişiklikleri, yüksek basınçlı işlem görmüş et ürünlerinin duyusal olarak kabul edilmesini sağlar. Bu bakımdan, basınçlı çığ et ürünleri, esasen renk değişikliği ile ilgili problemler doğurmaktadır [13]. Öte yandan, pişmiş ve işlenmiş et ürünleri genellikle yüksek basınçta daha az etkilenir ve bu tür ürünlerin ticari değeri daha fazladır.

VI. YÜKSEK BASINÇLI KORUMA VE DEKONTAMİNASYONUN AVANTAJLARI-DEZAVANTAJLARI

Gıdaların muhafazasında yüksek basınç teknolojinin avantajları ve dezavantajları Tablo 1'de listelenmişlerdir [81].

Tablo 1. Gıda ürünlerinin korunmasında ve dekontamine edilmesinde yüksek hidrostatik basınç teknolojisinin avantajları ve dezavantajları

	Avantajlar	Dezavantajlar
Ürünler	Su içeriği yüksek olan ürünler için uygundur Çiğ ürünün lezzet ve tekstürünün pişmiş ürüne yakın olması Isınma az ya da hiç İzostatik işlem, dolayısıyla basınç hem basınç ortamı hem de gıda boyunca hızlı ve düzgün bir şekilde iletilir. Şekil ve boyuttan bağımsız etki Mevcut dekontaminasyon teknolojilerinin yetersiz olduğu ürünler için uygun proses	a_w değeri düşük ürünlerde YHB'nin düşük etkisi Et tekstürü etkilenir Etin oksidasyonu yüksek basınçla hızlandırılabilir Etin, özellikle kırmızı etin renk bozulması olabilir Ekmek ve kek gibi hava içeren katı gıdalara, kremalara uygun değildir Gerekli sermaye yatırımının yüksek olması nedeniyle genellikle yüksek değerli ürünlere uygulanamayan süreç
Paketleme	Ürün ambalajı, hacim olarak %15'e kadar bir değişikliği barındırabilen ve ardından sızdırmazlık veya bariyer özelliklerini kaybetmeden orijinal şekline geri dönebilen bir ambalajdır	Paketleme, yüksek basınç teknolojisine göre uyarlanmalıdır Tamamen sert ambalajlar uygun değildir (konserve gıdalar, cam ambalajlar) Ambalaj, işlenmiş ürünü deforme etmeyecek şekilde tasarlanmalıdır Kimyasal maddelerin ambalajdan ürüne transferi ölçülmelidir
Gıda güvenliği ve raf ömrü	Bozulmaya neden olan mikroorganizmaları azaltarak ve enzimleri inaktive ederek raf ömrünün uzatılması Gıda kaynaklı patojenleri azaltarak gıda güvenliğini sağlamak	Laktik asit bakterileri, et endojen florasının en dirençli grubudur Bununla birlikte, YHB'nin inaktif bakteri sporlarında başarısız olduğu bilinmektedir Dekontaminasyon verimliliği büyük ölçüde matrise bağlıdır, bu nedenle HHP'nin ürüne göre incelenmesi gerekir
Ekipmanlar	Toplu işleme ve yarı otomatik işleme mevcut	Proseste hız sınırlayıcı basamak Ticari ölçek için yüksek maliyet YHB ekipmanındaki karmaşıklık, yapımında, kullanımında ve bakımında son derece yüksek hassasiyet gerektirir
Düzenleme		Avrupa "Yeni Gıdalar" Yönergesi yasal sorunları dile getirdi ve yeni basınçlı ürünlerin tanıtımını yavaşlattı.

VII. GIDALARIN KORUNMASINDA VE DEKONTAMİNASYONUNDA YÜKSEK BASINÇIN GELECEKTEKİ ROLÜ

A. Yüksek Değerli ve Yeni Fonksiyonel Ürünler İçin Isıl İşlem Değişikliği

Yüksek basınç uygulamaları ısıl işlem ve etlerin gevrekleştirilmesi işlemlerinin, gıda endüstrileri tarafından imal edilen sürülebilir sosler, karaciğer sosleri ve pişirilmiş-kürlenmiş et ürünleri imalatında yeni fırsatların ortaya çıkmasına katkı sağlayacak bir potansiyele sahiptir [82]. Bu ürünlerdeki geleneksel ısıl işlemlerin ikame edilmesiyle; tekstürün geliştirilmesi ve duyu ile besinsel özelliklerin muhafaza edilmesi sağlanabilir [82]. Yüksek basınç, özellikle yüksek değerli ve ısıya duyarlı ürünler için ilginç bir alternatif koruma yöntemini temsil edebilir [10]. Bu ürünler, biyolojik olarak aktif bileşiklerle formüle edilmiş yeni fonksiyonel gıdaları (özel takviyeler, fonksiyonel gıdalar, nutrasötikler ve doğal kişisel bakım ürünleri) içerir. YHB, muhafaza edilmiş biyolojik özelliklere sahip ve patojen içermeyen bileşenler içeren ürünler sağlayarak tüketici ve gıda güvenliği gereksinimlerini karşılayabilir.

B. Et Yumuşaması

YHB'nin ikinci potansiyel ortaya çıkma eğilimi, et yumuşamasıdır. Bu proses, belirli şartlarda, hayvanın ölümünden sonra, yüksek basınçta (200 MPa, birkaç dakika) et kesimi yapmaktan ibarettir. Rigor mortis sonrası etlerde yüksek basınç uygulanmasından kaynaklanan sertlikte, bu artışa dayanabilmek için YHB işlemlerinin orta sıcaklıkta (60 °C) yapılması gerekir [53]. Et yumuşaması, yüksek basınçlı işlemde etkilendiği gösterilen katepsinler ve kalpainlerle ilişkilidir [53]. Etin yumuşatılması, gıda endüstrisi için düşük değerli sığır eti ve kuzu eti kesimlerine değer katmanın ilginç bir yolunu temsil edebilir [82].

Son yıllarda yeni yüksek basınçlı teknolojiler ortaya çıkmıştır. Mevcut teknolojiler tarafından karşılanmayan yumuşaklık ve et kalitesi gereksinimlerini karşılamak için hidrodinamik basınç (HDB) veya şok dalgaları geliştirilmiştir [83]. HDB; yüksek enerjili bir patlayıcının sualtı patlamalarından gelen, ses hızını aşan hızlarda, şok dalgalı ön cephe oluşturur [84]. Şok dalga basıncı cepheleri, 70 ila 100 MPa, et sıcaklığında, neredeyse hiçbir artış olmadan, milisaniye fraksiyonlarında meydana gelir. HDB; sarkomerin fiziksel olarak parçalanması, miyofibrillerin parçalanması ve etin üzerinde muhtemelen ek bir indirekt yumuşatma etkisi ile etin yumuşamasını sağlar [83]. Yumuşaklık problemleri çoğunlukla kırmızı etleri etkilediğinden, bu teknoloji sığır ve domuz etlerine yöneliktir [84]. Ancak, salamura emilimini, dokusunu ve renk özelliklerini iyileştirmek için hindi eti üzerinde HDB kullanmanın bazı yararları gözlenmiştir [85].

C. YBP ve Diğer Teknolojilerin Kombinasyonu

Yüksek basınçlı pastörizasyonun (YBP) bakteri sporlarını inaktive edememesi dikkate alındığında, bu boşluğu doldurmak için ortaya çıkarılmış bir YBP tekniğinin geliştirilmesi hala zordur. YBP ve ısı-yüksek basınçlı sterilizasyon (YBS) veya basınç destekli sıcaklık sterilizasyonunun (PATS) kombinasyonu, bu amaç için kullanılacak stratejilerden biridir. Örneğin, Zhu ve ark. [86], *Clostridium sporogenes* sporlarının yüksek sıcaklıkta (80-100 °C), ekstra yağsız kıymadaki yüksek basınçlı yıkım kinetiğini incelemiştir. *Clostridium* sporlarının bu yöntemle geleneksel ısı işlemlerden daha kısa sürede tahrip edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Yüksek basınç kombinasyonu ve antibakteriyel veya bakteriyostatik maddelerin ilavesi, kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Birçok çalışmada, bakteriyosinlerin ve yüksek basıncın kullanımı araştırılmıştır [16, 21, 25].

VIII. SONUÇ

Yüksek basınç uygulamasının et teknolojisindeki önemi her geçen gün artmaktadır. Et ve et ürünlerinin kalitesini artırmakla birlikte, yeni ürün geliştirmede de kullanılabilmesi mümkün görülmektedir. Ancak yüksek basınç uygulanması ile ilgili yapılan çalışmalar henüz yetersiz olup, daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Aynı zamanda, bu yöntemin hem avantajları ve hem de dezavantajları bulunmaktadır. Bu açıdan bu durumların daha çok araştırmayla ortaya konulması gerekmektedir. Yüksek basınç teknolojisi ile ilgili yapılan çalışmalar ve pratikte uygulanabilirliği yüksek maliyeti nedeniyle tam olarak uygulama alanı bulamamıştır. Bu nedenle yüksek basınç teknolojisinin pratikte kullanılabilirliği bakımından ekonomik anlamda da avantajlı hale getirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Hite, B.H. (1899). The effect of pressure in the preservation of milk. *West Virginia University Agricultural Experiment Station Bulletin*, 15–35.
- [2] Basset, J., & Macheboeuf, M.A. (1932). Study of the biological effects of ultra-pressures: Resistances of bacteria, diastases and toxins to very high pressures. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences*, 195, 1431–1433.
- [3] Federighi, M., Tonello, C., De Lamballerie, M., & Ritz, M. (2001). *Les traitements hautes pressions des aliments, in Traitements ionisants et hautes pressions des aliments* (eds M. Federighi and J.L. Tholozan), Economica, Paris, pp. 151–227.
- [4] Farkas, D.F., & Hoover, D.G. (2000). High Pressure Processing. *Journal of Food Science*, 65, 8: 47–64.

- [5] Hugas, M., Garriga, M., & Monfort, J.M. (2002). New mild technologies in meat processing: High pressure as a model technology. *Meat Science*, 62, 359–371.
- [6] Balasubramaniam, V.M., Farr, S.B., & Turek, J. (2008). Preserving foods through high pressure processing. *Food Technology*, 62, 32–38.
- [7] Perrier-Cornet, J.-M., Moussa, M., & Gervais, P. (2009). Applications des hautes pressions hydrostatiques en agroalimentaire. *Techniques de l'ingénieur base documentaire: TIB430DUO*.
- [8] Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S., Balasubramaniam, V.M. et al. (2007). Opportunities and challenges in high pressure processing of foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47, 69–112.
- [9] Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., Samson, C. et al. (2011) High-pressure processing technologies for the pasteurization and sterilization of foods. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 969–985.
- [10] Torres, J.A., & Velazquez, G. (2005) Commercial opportunities and research challenges in the high pressure processing of foods. *Journal of Food Engineering*, 67, 95–112.
- [11] Tonello, C. (1998). Applications des hautes pressions en agroalimentaire. *Techniques de l' Ingenieur*, F2, F3220.
- [12] Yordanov, D.G., & Angelova, G.V. (2010) High pressure processing for foods preserving. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 24, 1940–1945.
- [13] Oğuzhan, P. 2013. Yüksek Hidrostatik Basınç Teknolojisinin Gıda Endüstrisinde Kullanımı. *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2): 205-219.
- [14] Nørrung, B., & Buncic, S. (2008). Microbial safety of meat in the European Union. *Meat Science*, 78, 14–24.
- [15] Garriga, M., Grèbol, N., Aymerich, M.T. et al. (2004). Microbial inactivation after high-pressure processing at 600MPa in commercial meat products over its shelf life. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5, 451–457.
- [16] Jofré, A., Aymerich, T., Grèbol, N., & Garriga, M. (2009a). Efficiency of high hydrostatic pressure at 600 MPa against food-borne microorganisms by challenge tests on convenience meat products. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, 42, 924–928.
- [17] Gola, S., Mutti, P., Manganeli, E. et al. (2000). Behaviour of E. coli O157:H7 strains in model system and in raw meat by hpp: Microbial and technological aspects. *High Pressure Research*, 19, 91–97.
- [18] Porto-Fett, A.C.S., Call, J.E., Shoyer, B.E. et al. (2010). Evaluation of fermentation, drying, and/or high pressure processing on viability of *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* spp., and *Trichinella spiralis* in raw pork and Genoa salami. *International Journal of Food Microbiology*, 140, 61–75.
- [19] Garriga, M., Aymerich, T., & Hugas, M. (2002a) Effect of High Pressure Processing on the Microbiology of Skin Vacuum Packaged Sliced Meat Products: Cooked Pork Ham, Dry Cured Pork Ham and Marinated Beef Loin. *Report from the Food Microbiology and Biotechnology Unit of IRTA (Institute for Food and Agricultural Research and Technology)*, Monells, 17 pp.
- [20] Morales, P., Calzada, J., Rodriguez, B. et al. (2009) Inactivation of *Salmonella enteritidis* in chicken breast fillets by single-cycle and multiple-cycle high pressure treatments. *Foodborne Pathogens and Disease*, 6, 577–581.
- [21] Marcos, B., Jofré, A., Aymerich, T. et al. (2008). Combined effect of natural antimicrobials and high pressure processing to prevent *Listeria monocytogenes* growth after a cold chain break during storage of cooked ham. *Food Control*, 19, 76–81.

- [22] Chen, H. (2007). Temperature-assisted pressure inactivation of *Listeria monocytogenes* in Turkey breast meat. *International Journal of Food Microbiology*, 117, 55–60.
- [23] oseki, S., Mizuno, Y., & Yamamoto, K. (2007). Predictive modelling of the recovery of *Listeria monocytogenes* on sliced cooked ham after high pressure processing. *International Journal of Food Microbiology*, 119, 300–307.
- [24] Jofré, A., Garriga, M., & Aymerich, T. (2008). Inhibition of *Salmonella* sp. *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* in cooked ham by combining antimicrobials, high hydrostatic pressure and refrigeration. *Meat Science*, 78, 53–59.
- [25] Aymerich, T., Jofré, A., Garriga, M., & Hugas, M. (2005). Inhibition of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* by Natural Antimicrobials and High Hydrostatic Pressure in Sliced Cooked Ham. *Journal of Food Protection*, 68, 173–177.
- [26] Garriga, M., Aymerich, T., & Hugas, M. (2002a). *Effect of High Pressure Processing on the Microbiology of Skin Vacuum Packaged Sliced Meat Products: Cooked Pork Ham, Dry Cured Pork Ham and Marinated Beef Loin. Report from the Food Microbiology and Biotechnology Unit of IRTA (Institute for Food and Agricultural Research and Technology), Monells, 17 pp.*
- [27] Jofré, A., Aymerich, T., & Garriga, M. (2009b). Improvement of the food safety of low acid fermented sausages by enterocins A and B and high pressure. *Food Control*, 20, 179–184.
- [28] Yuste, J., Pla, R., & Mor-Mur, M. (2000a). *Salmonella enteritidis* and aerobic mesophiles in inoculated poultry sausages manufactured with high-pressure processing. *Letters in Applied Microbiology*, 31, 374–377.
- [29] Escriu, R., & Mor-Mur, M. (2009). Role of quantity and quality of fat in meat models inoculated with *Listeria innocua* or *Salmonella Typhimurium* treated by high pressure and refrigerated stored. *Food Microbiology*, 26, 834–840.
- [30] Yuste, J., Pla, R., Capellas, M. et al. (2000b). High-Pressure Processing Applied to Cooked Sausages: Bacterial Populations during Chilled Storage. *Journal of Food Protection*, 63, 1093–1099.
- [31] Rubio, B., Martínez, B., García-Cachán, M.D. et al. (2007a). The effects of high pressure treatment and of storage periods on the quality of vacuum-packed “salchichón” made of raw material enriched in monounsaturated and polyunsaturated fatty acids. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8, 180–187.
- [32] Diez, A.M., Urso, R., Rantsiou, K. et al. (2008a). Spoilage of blood sausages morcilla de Burgos treated with high hydrostatic pressure. *International Journal of Food Microbiology*, 123, 246–253.
- [33] Ruiz-Capillas, C., Carballo, J., & Jiménez-Colmenero, F. (2007b). Consequences of high-pressure processing of vacuum-packaged frankfurters on the formation of polyamines: Effect of chilled storage. *Food Chemistry*, 104, 202–208.
- [34] López-Caballero, M.E., Carballo, J., & Jiménez-Colmenero, R. (2002a). Microbial Inactivation in Meat Products by Pressure/Temperature Processing. *Journal of Food Science*, 67, 797–801.
- [35] Carlez, A., Rosec, J.-P., Richard, N., & Cheftel, J.-C. (1994). Bacterial growth during chilled storage of pressure-treated minced meat. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, 27, 48–54.
- [36] López-Caballero, M., Carballo, J., Solas, M., & Jiménez-Colmenero, F. (2002b). Responses of *Pseudomonas fluorescens* to combined high pressure/temperature treatments. *European Food Research and Technology*, 214, 511–515.

- [37] Lopez-Caballero, M.E., Carballo, J., & Jimenez-Colmenero, F. (1999) Microbiological changes in pressurized, prepackaged sliced cooked ham. *Journal of Food Protection*, 62, 1411–1415.
- [38] Diez, A.M., Santos, E.M., Jaime, I., & Rovira, J. (2008b). Application of organic acid salts and high-pressure treatments to improve the preservation of blood sausage. *Food Microbiology*, 25, 154–161.
- [39] Simpson, R.K., & Gilmour, A. (1997). The resistance of *Listeria monocytogenes* to high hydrostatic pressure in foods. *Food Microbiology*, 14, 567–573.
- [40] Jung, S., Tonello Samson, C., & De Lamballerie, M. (2011). *High hydrostatic pressure food processing, in Alternative to conventional food processing*, vol. Chapter 6 (ed. A. Proctor), RSC Publishing, pp. 254–306.
- [41] Bouton, P.E., Ford, A.L., Harris, P.V. et al. (1977). Pressure-heat treatment of postrigor muscle: Effects on tenderness. *Journal of Food Science*, 42, 132–135.
- [42] Sun, X.D., & Holley, R.A. (2010) High hydrostatic pressure effects on the texture of meat and meat products. *Journal of Food Science*, 75, R17–R23.
- [43] Ma, H.J., & Ledward, D.A. (2004). High pressure/thermal treatment effects on the texture of beef muscle. *Meat Science*, 68, 347–355.
- [44] Del Olmo, A., Morales, P., Ávila, M. et al. (2010). Effect of single-cycle and multiple-cycle high-pressure treatments on the colour and texture of chicken breast fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11, 441–444.
- [45] Zamri, A.I., Ledward, D.A., & Frazier, R.A. (2006). Effect of combined heat and high-pressure treatments on the texture of chicken breast muscle (Pectoralis Fundus). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 2992–2996.
- [46] Jung, S., Ghoul, M., & de Lamballerie-Anton, M. (2000a). Changes in lysosomal enzyme activities and shear values of high pressure treated meat during ageing. *Meat Science*, 56, 239–246.
- [47] Ichinoseki, S., Nishiumi, T., & Suzuki, A. (2006). Tenderizing effect of high hydrostatic pressure on bovine intramuscular connective tissue. *Journal of Food Science*, 71, E276–E281.
- [48] Palamutoğlu, R., Karakaya, M., & Sarıçoban, C. (2006). Taze ve dondurulmuş sığır *Longissimus dorsi* kaslarının bazı teknolojik özellikleri üzerine bromelin, ficin ve papain enzimlerinin etkisi. *Gıda*, 109-116.
- [49] Schenková, N., Šiklová, M., Jeleníková, J. et al. (2007). Influence of high isostatic pressure and papain treatment on the quality of beef meat. *High Pressure Research*, 27, 163–168.
- [50] Clariana, M., & Garcia-Regueiro, J.A. (2011). Effect of high pressure processing on cholesterol oxidation products in vacuum packaged sliced dry-cured ham. *Food and Chemical Toxicology*, 49, 1468–1471.
- [51] Mor-Mur, M., & Yuste, J. (2003). High pressure processing applied to cooked sausage manufacture: Physical properties and sensory analysis. *Meat Science*, 65, 1187–1191.
- [52] Iwasaki, T., Noshiroya, K., Saitoh, N. et al. (2006). Studies of the effect of hydrostatic pressure pretreatment on thermal gelation of chicken myofibrils and pork meat patty. *Food Chemistry*, 95, 474–483.
- [53] Sikes, A.L., Tobin, A.B., & Tume, R.K. (2009). Use of high pressure to reduce cook loss and improve texture of low-salt beef sausage batters. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10, 405–412.
- [54] Fernández-Martín, F., Fernández, P., Carballo, J., & Jiménez Colmenero, F. (1997). Pressure/heat combinations on pork meat batters: Protein thermal behavior and product rheological properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45, 4440–4445.

- [55] Yuste, J., Mor-Mur, M., Capellas, M. et al. (1999). Mechanically recovered poultry meat sausages manufactured with high hydrostatic pressure. *Poultry Science*, 78, 914–921.
- [56] Supavititpatana, T., & Apichartsrangkoon, A. (2007). Combination effects of ultra-high pressure and temperature on the physical and thermal properties of ostrich meat sausage (yor). *Meat Science*, 76, 555–560.
- [57] Chattong, U., & Apichartsrangkoon, A. (2009). Dynamic viscoelastic characterisation of ostrich-meat yor (Thai sausage) following pressure, temperature and holding time regimes. *Meat Science*, 81, 426–432.
- [58] Jimenez-Colmenero, F., Fernandez, P., Carballo, J., & Fernandez-Martin, F. (1998). High-pressure-cooked low-fat pork and chicken batters as affected by salt levels and cooking temperature. *Journal of Food Science*, 63, 656–659.
- [59] Cheftel, J.C., & Culioli, J. (1997). Effects of high pressure on meat: A review. *Meat Science*, 46, 211–236.
- [60] Chapleau, N., Mangavel, C., Compoin, J.P., & de Lamballerie-Anton, M. (2004). Effect of high-pressure processing on myofibrillar protein structure. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 66–74.
- [61] Tuboly, E., Lebovics, V.K., Gaál, Ö. et al. (2003). Microbiological and lipid oxidation studies on mechanically deboned turkey meat treated by high hydrostatic pressure. *Journal of Food Engineering*, 56, 241–244.
- [62] Beltran, E., Pla, R., Capellas, M. et al. (2004a). Lipid oxidation and colour in pressure and heat-treated minced chicken thighs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 1285–1289.
- [63] Orlien, V., Hansen, E., & Skibsted, L.H. (2000). Lipid oxidation in high-pressure processed chicken breast muscle during chill storage: Critical working pressure in relation to oxidation mechanism. *European Food Research and Technology*, 211, 99–104.
- [64] Andres, A., Adamsen, C., Moller, J. et al. (2006). High-pressure treatment of dry-cured Iberian ham. Effect on colour and oxidative stability during chill storage packed in modified atmosphere. *European Food Research and Technology*, 222, 486–491.
- [65] Campus, M., Flores, M., Martinez, A., & Toldrá, F. (2008). Effect of high pressure treatment on colour, microbial and chemical characteristics of dry cured loin. *Meat Science*, 80, 1174–1181.
- [66] Cheah, P.B., & Ledward, D.A. (1997). Inhibition of metmyoglobin formation in fresh beef by pressure treatment. *Meat Science*, 45, 411–418.
- [67] Ma, H.J., Ledward, D.A., Zamri, A.I. et al. (2007). Effects of high pressure/thermal treatment on lipid oxidation in beef and chicken muscle. *Food Chemistry*, 104, 1575–1579.
- [68] Schindler, S., Krings, U., Berger, R.G., & Orlien, V. (2010). Aroma development in high pressure treated beef and chicken meat compared to raw and heat treated. *Meat Science*, 86, 317–323.
- [69] Fuentes, V., Ventanas, J., Morcuende, D. et al. (2010). Lipid and protein oxidation and sensory properties of vacuum-packaged dry-cured ham subjected to high hydrostatic pressure. *Meat Science*, 85, 506–514.
- [70] Angsupanich, K., & Ledward, D.A. (1998). High pressure treatment effects on cod (*Gadus morhua*) muscle. *Food Chemistry*, 63, 39–50.
- [71] Carballo, J., Fernandez, P., Carrascosa, A.V. et al. (1997). Characteristics of low-and high-fat beef patties: Effect of high hydrostatic pressure. *Journal of Food Protection*, 60, 48–53.
- [72] Marcos, B., Kerry, J.P., & Mullen, A.M. (2010). High pressure induced changes on sarcoplasmic protein fraction and quality indicators. *Meat Science*, 85, 115–120.

- [73] Jung, S., Ghoul, M., & de Lamballerie-Anton, M. (2003). Influence of high pressure on the color and microbial quality of beef meat. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, 36, 625–631.
- [74] Goutefongea, R., Rampon, V., Nicolas, J., & Dumont, J. (1995). *Meat Color Changes Under High Pressure Treatment*. Proceeding of the 41st International Congress of Meat Science and Technology, San Antonio, Texas.
- [75] Carlez, A., Veciana-Nogues, T., & Cheftel, J.-C. (1995). Changes in colour and myoglobin of minced beef meat due to high pressure processing. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, 28, 528–538.
- [76] Cava, R., Ladero, L., Gonzalez, S. et al. (2009). Effect of pressure and holding time on colour, protein and lipid oxidation of sliced dry-cured Iberian ham and loin during refrigerated storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10, 76–81.
- [77] Wackerbarth, H., Kuhlmann, U., Tintchev, F. et al. (2009). Structural changes of myoglobin in pressure-treated pork meat probed by resonance Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 115, 1194–1198.
- [78] Colmenero, F.J., Carballo, J., Fernández, P. et al. (1997). High-pressure-induced changes in the characteristics of low-fat and high-fat sausages. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 75, 61–66.
- [79] Karłowski, K., Windyga, B., Fonberg-Broczek, M. et al. (2002). Effects of high pressure treatment on the microbiological quality, texture and colour of vacuum packed pork meat products. *High Pressure Research*, 22, 725–732.
- [80] Rubio, B., Martínez, B., García-Cachán, M.D. et al. (2007b). Effect of high pressure preservation on the quality of dry cured beef “Cecina de Leon”. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8, 102–110.
- [81] Kadam, P.S., Jadhav, B.A., Salve, R.V., & Machewad, G.M. (2012). Review on the high pressure technology (HPT) for food preservation. *Journal of Food Processing & Technology*, 3, 135.
- [82] Purroy-Balda, F., Val Aparicio, B., & Tonello, S.C. (2012). Industrial high pressure processing of foods: Review of evolution and emerging trends. *Journal of Food Science and Engineering*, 2, 543–549.
- [83] Bajovic, B., Bolumar, T., & Heinz, V. (2012). Quality considerations with high pressure processing of fresh and value added meat products. *Meat Science*, 92, 280–289.
- [84] Solomon, M.B., Liu, M.N., Patel, J.R. et al. (2010). *Hydrodynamic Pressure Processing to improve meat quality and safety*, in *Advanced Technologies for Meat Processing* vol. Chapter 9 (eds L.M.L. Nollet and F. Toldra), CRC Press, Taylor & Francis, New York, pp. 219–244.
- [85] Bowker, B.C., Callahan, J.A., & Solomon, M.B. (2010). Effects of hydrodynamic pressure processing on the marination and meat quality of turkey breasts. *Poultry Science*, 89, 1744–1749.
- [86] Zhu, S., Naim, F., Marcotte, M. et al. (2008). High-pressure destruction kinetics of *Clostridium sporogenes* spores in ground beef at elevated temperatures. *International Journal of Food Microbiology*, 126, 86–92.

Düzeltilme - Erratum

Atık Tavuk Tüyünün Zemin İyileştirmesinde Değerlendirilmesi

Burak Görgün^{1*}, Ertaş Bozkurt², Duygu Kuru³, Alev Akpınar Borazan⁴, Nazile Ural⁵

Geliş / Received: 29/11/2018

Revize / Revised: 24/12/2018

Kabul / Accepted: 14/12/2018

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, tavuk kesim tesislerinde ortaya çıkan atık tavuk tüyünün siltli zeminlerin iyileştirilmesinde katkı malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağına araştırılmasıdır. Zayıf temel zeminlerinde karşılaşılan yetersiz taşıma gücü ve yüksek deformasyon sorunları temel zeminini iyileştirme konusunda yeni yöntemlerin geliştirilmesini ve uygulamasını gerekli kılmaktadır. Mekanik iyileştirmenin yeterli olmadığı veya kullanılmadığı durumlarda kimyasal iyileştirme veya atıkların kullanılması bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, silte %1 ve %3 oranlarında toz atık tavuk tüyü, kesilmiş atık tavuk tüyü ve tam atık tavuk tüyü olacak şekilde tavuk tüyleri eklenerek karışımlar hazırlanmış ve standart kompaksiyon deneyi ile hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, atık tavuk tüyünün pahalı liflere alternatif potansiyel malzeme olabileceği fakat daha farklı boyutta, farklı oranlarda ve farklı katkı malzemeleriyle deney sayısının artırılmasının gerekli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Silt, Atık Tavuk Tüyü, Standart Kompaksiyon, Serbest Basınç Deneyi, Mikroyapı

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: burak.gorgun@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7681-863X>)

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

²İletişim: ertaccbozkurt@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7715-9907>)

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

³İletişim: duygu.gokdai@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9727-5785>)

³Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

⁴İletişim: alev.akpinar@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3815-2101>)

⁴Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

⁵İletişim: nazile.ural@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2268-842X>)

⁵İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

Evaluation of Waste Chicken Feather in Soil Improvement

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate that the waste chicken feather, which occur in chicken cutting plants, can or can't be used as additive in the improvement of silty soils. It is necessary that the development and application of new methods to improve the foundation soil because of the inadequate bearing strength and high deformation problems encountered in weak foundation soil. In cases where mechanical improvement is not enough or cannot be used, chemical improvement or the use of wastes can be alternative. In this study, 1% and 3% powder waste chicken feather, cut waste chicken feather and full chicken feathers were added to soil and these samples were subjected to standard compaction test and unconfined compression test. As a result of the study, it has been seen that waste chicken feather can be an alternative potential material for expensive geotextiles but it is necessary to increase the number of experiments with different sizes, different ratios and different additives.

Keywords- *Silt, Waste Chicken Feather, Standart Compaction Test, Unconfined Compression Test, Microstructure*

I. GİRİŞ

Zemin iyileştirmesi, geoteknik mühendisliğinde uzun zamandır uygulanan ve sürekli kullanılan malzeme ve yöntem olarak kendisini yenileyen bir konudur. Eski kaynaklara göre, Babil Tapınağının yapım sürecinde zemin iyileştirmesi yapıldığı ve eski dönemlerde Çinlilerin bambu veya saman çöpü gibi malzemeleri zemin iyileştirmede kullandıkları bilinmektedir [1]. Günümüzde ise tüketimin artması ve hammaddenin azalması sonucunda artan endüstriyel atıkların ekonomiye kazandırılması için bu atıkların geri kazanımının gerekliliği görülmektedir. Zemin iyileştirmesi, genel olarak zeminin birim hacim ağırlığının artırılması, yer altı su seviyesinin düşürülmesi, hidrolik iletkenlik katsayısının istenen düzeye getirilmesi, şişme/büzülme özelliğinin azaltılması ve zeminin dağınık yapısını çeşitli malzemelerin kullanılarak veya kullanılmayarak güçlendirilmesidir. Mevcut zemin özelliklerinin geoteknik mühendisliği açısından uygun olmadığı durumlarda, mekanik veya kimyasal zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi kullanılmaktadır. Kimyasal iyileştirmede, katkı maddeleri ile uygun olmayan zemin özelliklerinin uygun hale getirilmesi sağlanmaktadır. Kimyasal katkı maddesi olarak çimento, kireç, uçucu kül, atık cam, atık mermer tozu veya parçaları kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemlerinde atık malzemelerin kullanılmasıyla, doğal çevre kirliliğinin ve ekonomik kaybın azalması sağlanmakta ve doğadaki ham malzemelerin azalmasına engel olunmaktadır. Tavuk çiftliklerinde tüylerin çevreye atılması ve yakılmasının yasaklanmasından dolayı tavuk tüyünün değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Türkiye, 2015 yılında yaklaşık 2 milyon ton tavuk eti üretiminde bulunmuştur. Bu değer ile AB ülkelerindeki toplam üretimin %18'i karşılanmışsa da 200 bin ton tavuk tüyü atığına yol açılmıştır [2]. Bu durum, atıkların hem çevreye hem de insan sağlığına zarar vermeyecek, sürdürülebilir bir şekilde bertaraf edilmesinin daha çok önem kazandığı günümüzde, tavukçuluktan kaynaklanan yüksek miktarlardaki atığın ne şekilde bertaraf edileceği sorusunu da beraberinde getirmiştir [3].

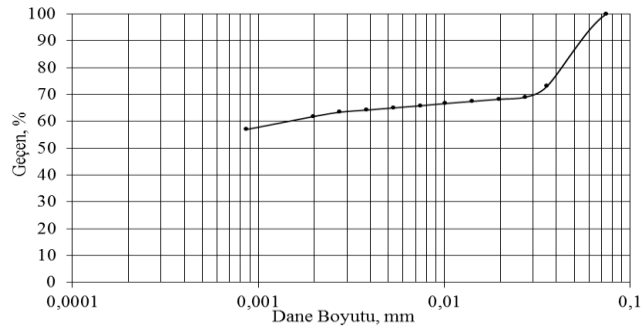
Endüstriyel bir atık olarak karşımıza çıkan bu doğal atık malzemesinin miktarının çok olmasından dolayı değerlendirmesi önem arz etmektedir. Atık tavuk tüyü, tavukçuluk üretiminde istenmeyen bir ürün veya malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. İşletmelerde üretim sonrası ortaya çıkan büyük miktarda atık tüyler ciddi katı atık sorununu meydana getirmektedir [4]. Atık tavuk tüyünün yeniden kullanımı ile ilgili az da olsa kristal yapısından dolayı farklı bilim dallarında çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan birisi olan, Ananda Rao vd. (2007) çalışmasında yazarlar tavuk tüyü katkılı epoksi kompozitlerde zayıf eğilme mukavemetini ve gerilme kuvvetini gözlemişler ve sonuç olarak aşınma performansının kısa tüy liflerinin takviyesi ile önemli gelişme gösterdiğini söylemişlerdir [5]. Uzun vd. (2011) ağırlıkça artan oranda tavuk tüyü ilavesinin vinil ester, polyester matrikslerin kullanıldığı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisini incelemiş ve lif ilavesinin artan miktarının mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini belirlemişlerdir [6]. Zhan ve Wool (2013) yılında epoksi ve tavuk tüyü lifiyle yaptıkları kompozit çalışmasında tavuk tüyü liflerinin yarı kristal yapısı nedeniyle farklı sıcaklıkta eksenel yönde negatif, radyal yönde pozitif bir ısıl genleşme değerine sahip olduğunu belirlemişlerdir [7]. Tavuk tüyünün içerdiği yüksek orandaki keratin, tüyün hidrofobik karakteri kompozit malzemede yoğunluk, termal, termomekanik özelliklere olumlu etki sağlamıştır [8-9]. Atık tavuk tüyü bazı çalışmalarda ise malzemelerin güçlendirmesinde kullanılmıştır [10-14]. Işık vd. (2015) çalışmasında yüksek plastisiteli kil zeminin iyileştirilmesinde, atık tavuk tüyünün kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında, atık tavuk tüyü, telek ve tüy lifi olarak %1.0 ve %2.0 oranlarında kullanılmıştır. Karışımlardan sonra hazırlanan numuneler 5 ve 10 donma-çözülme çevrim sayısına maruz bırakılmış ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Sonuçta, 4 mm telek kullanılmasının numunelerin serbest basınç mukavemetine olumlu bir etkisinin olmadığı ve 8 mm telek kullanılan numunelerde ise serbest basınç mukavemet değerinde önemli bir artış olmadığı gözlemlenirken, tüy lifli numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri artış göstermiştir [15]. Montes-Zarazúa vd (2015), %0.25, 0.50, 1.00 ve 3.00 oranlarında tavuk tüyünü kullanarak, zeminlerin şişme özelliklerindeki değişiklikler incelemişlerdir. Ödometrede deney sistemi kullanılarak şişme deneyleri yapılmış ve sonuçta tavuk tüylerinin şişen zeminlerde şişme basıncını azalttığını söylemişlerdir [16].

Bu çalışmada, tavuk tüyleri 3 farklı formda katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Böylelikle, tavuk tüyünün siltin geoteknik özelliklerine etkisi incelenmiş ve farklı oran ve boyutlardaki tavuk tüyünün zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

II. MALZEME

Kullanılan zemin malzemesi orta plastisiteli silt (MI) olup dane çapı dağılımı Şekil 1’de verilmiştir. Özel bir tavuk üretim firmasından alınan atık tavuk tüyleri, öncelikle yıkanmış ve havada kuruması sağlanmıştır. Atık tavuk tüyleri kurutulduktan sonra tam, yarım ve toz halinde olmak üzere üç farklı şekilde hazırlanmıştır (Şekil 2). Buna göre atık tavuk tüyleri bölgesel bir tavuk işletmesinden alındıktan sonra tüylerin stabil teknik bir malzemeye dönüştürülmesi amacıyla bazı ön işlemler uygulanmıştır; önce çeşme suyunda yıkanmış ve 135 °C’de 20 dakika sterilize edilmiş, sonra etüvde 60 °C’de 24 saat bekletilerek birinci kurutma, 105 °C’de 2 saat bekletilerek ikinci kurutma uygulanmıştır. Daha sonra tavuk tüyelerinin mekanik olarak küçük parçalara kesimleri yapılmıştır. Toz olarak kullanılacaklar laboratuvar değirmeninde öğütülmüş, boyutun 0.425 µm ve daha küçük olması sağlanmıştır.

Tavuk tüyü lifleri, içi boş ve sert yapıda protein lifidir. Bu lifler ısıtıldığında çapraz bağlar oluşur ve bu bağlar yapıyı sağlamlaştırmanın yanı sıra yapının daha gözenekli hale dönüşmesini sağlar. Tavuk tüyü diğer lifli malzemelerle benzer özelliklere sahiptir ve özellikle keratin yapıda olmasından dolayı yüne benzer. Selülozik liflerden 6-8 kat daha sağlamdır. Bazı özel uygulama alanlarında yün ve pamuk gibi doğal liflere kıyasla daha üstün özelliklere sahiptir. Liflerin ince olması temas yüzeyinin de daha geniş olmasını sağlar. Islak ortamda bozulmaya karşı dayanımı fazladır, suya doymuş halde bile hacmini koruma eğilimindedir. Kristal yapısından dolayı kararlı ve dayanıklıdır, bu özellikler kullanım alanlarının genişlemesine ve pahalı liflere daha ucuz alternatif oluşturmasını sağlar. Bu özelliklerinden dolayı farklı bilim dallarında çalışmalar yapılmaktadır. İnşaat kompozitlerine uygun olmasından dolayı da bu alanda çalışmalar yapılabilmektedir. Yalıtım ve kaplama amaçlı kullanılması (lambiri ve tavan gibi) kirli alanlara binen ağırlığı azaltarak yapının yük dayanımını artırabilir. Endüstri atık sularında yaygın olarak bulunan fenolü emmesiyle bu suların temizlenmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise toz atık tavuk tüyü geoteknik çalışmalarından birisi olan zemin iyileştirme amaçlı kullanılmıştır. Ayrıca, literatürle benzer olarak tavuk tüyelerinin yüksek protein içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Tavuk tüyü lifinin saç, tırnak ve hayvan boynuzlarında bulunan en yüksek miktardaki proteinin, çözünmeyen ve yüksek dayanıklılığa sahip olan keratinden oluştuğu görülmüştür. Keratin bir dizi amino asit içerir, bu amino asitler disülfid veya hidrojen bağları oluşturarak birbirleriyle çapraz bağlanma eğilimindedir. Bu da kompozit yapıya daha sert, güçlü, hafif olma özellikleri yanında iyi termal ve akustik yalıtım özellikleride kazandırabilmektedir [17-19].



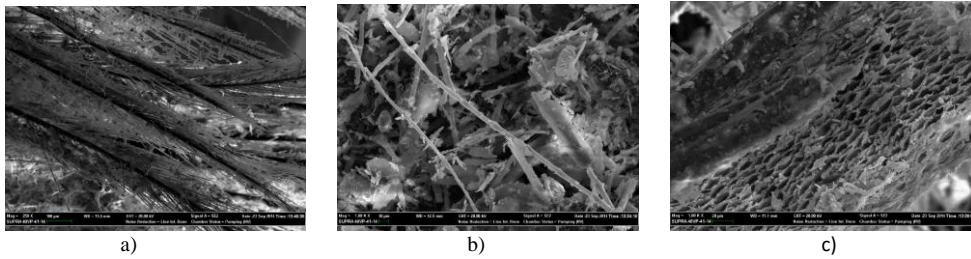
Şekil 1. Siltin dane çapı dağılımı



Şekil 2. a) Tam atık tavuk tüyü b) Kesilmiş atık tavuk tüyü c) Toz atık tavuk tüyü

III. YÖNTEM

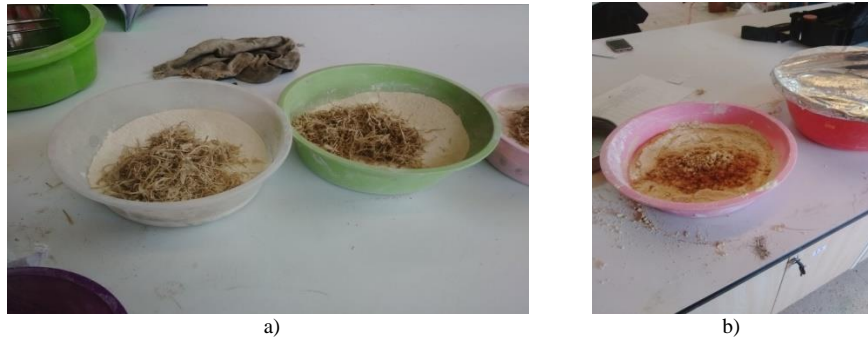
Öncelikle siltin likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Likit limit değeri 42 ve plastik limit değeri 33 olarak bulunmuştur. Tavuk tüylerinin genel kimyasal analizi AOAC (2002) standartlarına göre yapılmıştır [20]. % nem miktarı gravimetrik yöntemle $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde bekletilerek AOAC 945.21'e göre, % kül miktarı gravimetrik yöntemle 550°C 'de etüvde bekletilerek AOAC 923.03'e göre, protein miktarı Kjeldahl metoduyla AOAC 962.18'e göre belirlenen toplam azot miktarının 6,25 faktörüyle çarpılmasıyla, % yağ miktarı sokshlet metoduyla petrol eteri kullanılarak AOAC 920.39'e göre tayin edilmiştir. Tavuk tüyünün genel kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca tavuk tüyüne ait SEM görüntüsü Zeiss Supra 40VP ile elde edilmiştir (Şekil 3). Çalışma kapsamında, silte %1 ve %3 tam, kesilmiş ve toz atık tavuk tüyü eklenerek oluşturulan karışımlar Şekil 4.'de görülmektedir.



Şekil 3. a) Tavuk tüyünün mikroyapı görüntüsü b) Tüyün bulunduğu iskelet kısmı c) İskeletin peteksi iç dokusu

Tablo 1 Tavuk tüyü genel kimyasal bileşimi

	(%, Kuru bazda)
Ham Protein	77,00±0,78
Ham yağ	3,95±0,41
Kül	1,85±0,11
Nem	10,94±0,18

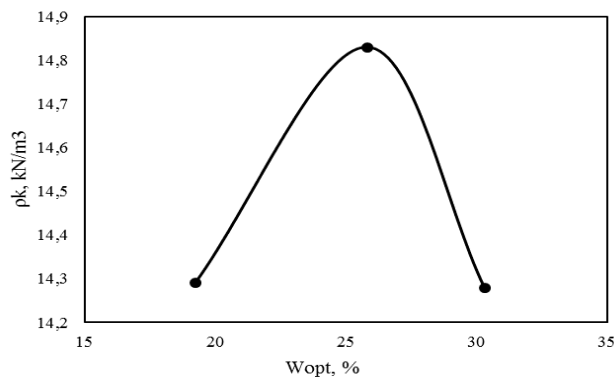


Şekil 4. a) Toz atık tavuk tüyü ve silt b) Kesilmemiş atık tavuk tüyü ve silt

Karışımlar hazırlandıktan sonra ASTM D698 (2012)'ye göre standart kompaksiyon deneyi yapılmıştır (Şekil 5) [21]. Şekil 6.'da siltin standart kompaksiyon deney sonucu elde edilen eğrisi verilmiştir. Tablo 2'de karışımların standart kompaksiyon deney sonucunda elde edilen optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlıkları görülmektedir. Atık tavuk tüy miktarının artmasıyla optimum su muhtevasının arttığı, maximum kuru birim hacim ağırlığın ise azaldığı görülmüştür. Fakat tüylerin küçülmesiyle optimum su muhtevalarının daha az arttığı görülmüştür. Optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenen karışımlar serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 7.' de numunelerin serbest basınç deneyine hazırlanması görülmektedir. Serbest basınç deneyi ASTM D2166 (2016)'ya göre yapılmıştır [22]. Serbest basınç deney sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Serbest basınç deneylerinde %3 kesilmiş atık tavuk tüyü ve %3 tam atık tavuk tüyü ile yapılan deneylerde birim boy kısalması %20'yi aştığı için deneyler sonlandırılmıştır. %1 kesilmiş atık tavuk tüyü katkılı numunenin dayanımı %2 artarken, diğer karışımların dayanımı azalmıştır. Şekil 9'da katkı yüzdelерinin serbest basınca etkisi görülmektedir.



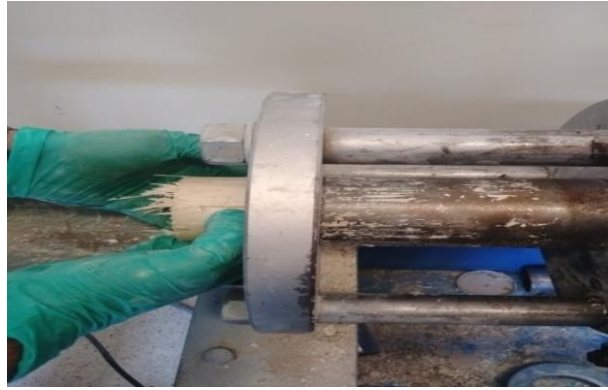
Şekil 5. Kompaksiyon sonrası atık tavuk tüyü ve silt karışımının kompaksiyon kalıbından çıkarılması



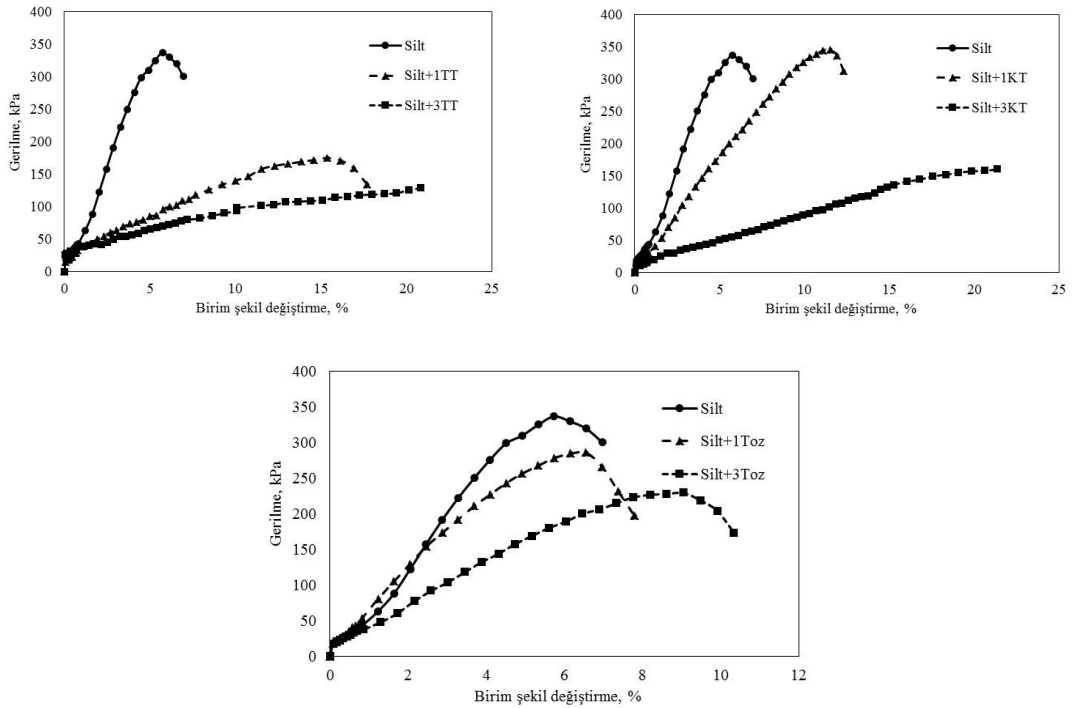
Şekil 6. Siltin standart kompaksiyon deney sonucu

Tablo 2. Standart kompaksiyon deneyi sonuçları

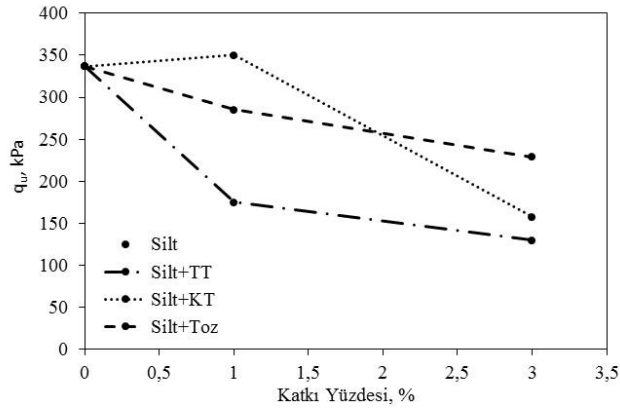
Numune	W_{opt} , %	ρ_{kmax} , kN/m^3
Silt	25	14.82
Silt + %1 Tam Tüy	30	14.15
Silt + %3 Tam Tüy	34	12.80
Silt + %1 Kesilmiş Tüy	28	14.17
Silt + %3 Kesilmiş Tüy	32	13.62
Silt + %1 Toz Tüy	25	14.52
Silt + %3 Toz Tüy	28	13.75



Şekil 7. Numunenin çıkarılması



Şekil 8. Karışımların serbest basınç dayanım eğrileri



Şekil 9. Katkı yüzdelere serbest basınç dayanımına etkisi

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, atık tavuk tüyü silte toz, kesilmiş ve tam olmak üzere %1 ve %3 oranlarında eklenerek, zeminlerin serbest basınç dayanımında doğal lif olarak kullanılan atık tavuk tüylerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle standart kompaksiyon deneyleri yapılmış ve atık tavuk tüy miktarının artmasıyla optimum su muhtevasının arttığı, atık tavuk tüylerinin boyutlarının küçülmesiyle optimum su muhtevallarının daha az arttığı görülmüştür. Standart kompaksiyon deneyi ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçlarından, %1 kesilmiş atık tavuk tüyü katkılı numunenin dışındaki tüm karışımlarda serbest basınç dayanımının azaldığı ve daha farklı yüzdelerde, boyutlarda ve biçimlerde deney sayısının artırılmasının gerekliliği görülmüştür. Sonuç olarak, atık tavuk tüyünün pahalı liflere alternatif potansiyel malzeme olabileceği görülmüş fakat atık tavuk tüyünün zemin iyileştirmede kullanılabilirliğinin daha net belirlenebilmesi için daha farklı boyutta, farklı oranlarda ve farklı katkı malzemeleriyle deney sayısının artırılmasının gerekliliği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Van Impe, W. E., "Soil improvement techniques and their evaluation", *Balkema*, Rotterdam, Netherlands, 1989.
- [2] Türkiye İstatistik Kurumu website, Haber Bülteni - Kümes Hayvancılığı Üretimi, [Online]. Available: http://www.tuik.gov.tr/basinOdasi/haberler/2016_40_20160330.pdf, 2016.
- [3] Sarı Ö.F., Özdemir, S., Tavuk Kesimhane Atıklarının Yönetimi ve Alternatif Değerlendirme Yöntemleri, Sakarya Ticaret Borsası website, [Online]. Available: <https://www.stb.org.tr/Dosyalar/Arastirmalar/tavuk-kesimhane-atiklarinin-yonetimi.pdf>, 2018.
- [4] Bartels, T., "Variations in the morphology, distribution, and arrangement of feathers in domesticated birds", *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, vol. 298(1), pp. 91-108, 2003.
- [5] Rao, A., V., Satapathy, A. ve Mishra, S. C., "Polymer Composites Reinforced with Short Fibers Obtained from Poultry Feathers", *Proceedings of International and INCCOM-6 Conference Future Trends in Composite Materials and Processing*, Indian Institute of Technology, Kanpur, 2007.
- [6] Uzun, M., Sancak, E., Patel, I., Usta, I., Akalin, M. ve Yuksek, M., "Mechanical Behaviour of Chicken Quills and Chicken Feather Fibres Reinforced Polymeric Composites", *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 52(2): pp. 82-86, 2011.

- [7] Zhan M. ve Wool R.P., “Thermal Expansivity of Chicken Feather Fiber Reinforced Epoxy Composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 128(2), pp. 997-1003, 2013.
- [8] Flores-Hernández, C. G, Colín-Cruz, A., Velasco-Santos, C., Castaño, V. M., Rivera-Armenta J. L., Almendarez-Camarillo, A., García-Casillas, P. E. ve Martínez-Hernández, A. L., “All green composites from fully renewable biopolymers: Chitosan-starch reinforced with keratin from feathers” , *Polymers*, vol. 6(3), pp. 686-705, 2014.
- [9] Jimenez-Cervantes Amieva, E., Velasco-Santos, C., Martinez-Hernandez, A. L., Rivera-Armenta, J. L., Mendoza-Martinez, A. M. ve Castano, V. M., “Composites from Chicken Feathers Quill and Recycled Polypropylene”, *Journal of Composite Materials*, vol. 49(3), pp. 275–283, 2014.
- [10] Dweib, M. A., Bullions, T. A., Loss, A. C. ve Wool, R. P., “Recycled Newspaper and Chicken Feathers as Reinforcement Fiber in Bio-Composite Materials”, *Proc. Annual Technical Conference - ANTEC*, pp. 1478-1482, 2004.
- [11] Acda, M. N., “Waste chicken feather as reinforcement in cement-bonded composites”, *Philippine Journal of Science*, vol. 139(2), pp. 161-166, 2010.
- [12] Uzun, M., Sancak, E., Patel, I., Usta, I., Akalın, M. ve Yuksek, M., “Mechanical behaviour of chicken quills and chicken feather fibres reinforced polymeric composites”, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 52(2), pp. 82-86, 2011.
- [13] Subramani, T., Krishnan, S., Ganesan, S. K. ve Nagarajan, G., “Investigation of mechanical properties in polyester and phenylester composites reinforced with chicken feather fiber”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 1(4), 93-104, 2014.
- [14] Amieva, E. J-C., Velasco-Santos, C., Martinez-Hernandez, A. L., Rivera-Armenta, J. L., Mendoza-Martinez, A. M. ve Castan, V. M., “Composites from chicken feathers quill and recycled polypropylene”, *Journal of Composite Materials*, vol. 49(3), pp. 275–283, 2015.
- [15] Işık, F., Akbulut R. K., Zaimoğlu, A. Ş. ve Arasan, S., “Kil Zeminlerin İyileştirmesinde Atık Doğal Liflerin Kullanabilirliği”, *6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana*, 2015.
- [16] Montes-Zarazua E., Colin-Cruz A., Perez-Rea M. D., de Icaza M., Velasco-Santos C., Martinez-Hernandez A. L., “Effect of Keratin Structures from Chicken Feathers on Expansive Soil Remediation”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, Article ID 907567, 10 pages, 2015.
- [17] Schmidt, W. F., “Innovative feather utilization strategies”, *Proc. National Poultry Waste Management Symposium*, Auburn University Printing Services, pp. 276-282, 1998.
- [18] Acda, M. N. “Waste Chicken Feather as Reinforcement in Cement-Bonded Composites”, *Philippine Journal of Science*, vol. 139, pp. 161-166, 2010.
- [19] Tseng, F.C.J, Verbeek, C.J.R. “Biofibre production from chicken feather”, *Proc. SCENZI Chemical Annual Conference 2011*, New Zealand, 2011.
- [20] AOAC, “Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists”, 17th Ed., Editor; William Horwitz, 2002.
- [21] ASTM D 698, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort”, *Annual book of ASTM Standards*, vol. 15.09, West Conshohocken PA, 2012.



- [22] ASTM D 2166, “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, *Annual book of ASTM Standards*, vol. 4.08, West Conshohocken PA, 2016.



Düzeltilme - Erratum

Atık Tavuk Tüyünün Zemin İyileştirmesinde Değerlendirilmesi

Burak Görgün^{1*}, Ertaş Bozkurt², Duygu Kuru³, Alev Akpınar Borazan⁴, Nazile Ural⁵

Geliş / Received: 29/11/2018

Revize / Revised: 24/12/2018

Kabul / Accepted: 14/12/2018

DÜZELTME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisinin 2018 yılı, 5. Cilt, 2. Sayısında yayımlanan “*Atık Tavuk Tüyünün Zemin İyileştirmesinde Değerlendirilmesi*” başlıklı makalede, 3. yazar soyadı sehven yanlış yazılmış olup “Gökdağ” olarak yazılan soyadı “Kuru” olarak düzeltilmiştir.

Düzeltilme - Erratum

Atık Tavuk Tüyünün Zemin İyileştirmesinde Değerlendirilmesi

Burak Görgün^{1*}, Ertaş Bozkurt², Duygu Kuru³, Alev Akpınar Borazan⁴, Nazile Ural⁵

Geliş / Received: 29/11/2018

Revize / Revised: 24/12/2018

Kabul / Accepted: 14/12/2018

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, tavuk kesim tesislerinde ortaya çıkan atık tavuk tüyünün siltli zeminlerin iyileştirilmesinde katkı malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağına araştırılmasıdır. Zayıf temel zeminlerinde karşılaşılan yetersiz taşıma gücü ve yüksek deformasyon sorunları temel zeminini iyileştirme konusunda yeni yöntemlerin geliştirilmesini ve uygulamasını gerekli kılmaktadır. Mekanik iyileştirmenin yeterli olmadığı veya kullanılmadığı durumlarda kimyasal iyileştirme veya atıkların kullanılması bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, silte %1 ve %3 oranlarında toz atık tavuk tüyü, kesilmiş atık tavuk tüyü ve tam atık tavuk tüyü olacak şekilde tavuk tüyleri eklenerek karışımlar hazırlanmış ve standart kompaksiyon deneyi ile hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, atık tavuk tüyünün pahalı liflere alternatif potansiyel malzeme olabileceği fakat daha farklı boyutta, farklı oranlarda ve farklı katkı malzemeleriyle deney sayısının artırılmasının gerekli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Silt, Atık Tavuk Tüyü, Standart Kompaksiyon, Serbest Basınç Deneyi, Mikroyapı

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: burak.gorgun@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7681-863X>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

²İletişim: ertacbozkurt@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7715-9907>)

Bölüm Adı, Üniversite Adı, Adres veya İkinci Şirket İsmi, Şirket İsmi de İçeren Adres Bilgisi

³İletişim: duygu.gokdai@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9727-5785>)

Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

⁴İletişim: alev.akpinar@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3815-2101>)

Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

⁵İletişim: nazile.ural@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2268-842X>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik

Evaluation of Waste Chicken Feather in Soil Improvement

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate that the waste chicken feather, which occur in chicken cutting plants, can or can't be used as additive in the improvement of silty soils. It is necessary that the development and application of new methods to improve the foundation soil because of the inadequate bearing strength and high deformation problems encountered in weak foundation soil. In cases where mechanical improvement is not enough or cannot be used, chemical improvement or the use of wastes can be alternative. In this study, 1% and 3% powder waste chicken feather, cut waste chicken feather and full chicken feathers were added to soil and these samples were subjected to standard compaction test and unconfined compression test. As a result of the study, it has been seen that waste chicken feather can be an alternative potential material for expensive geotextiles but it is necessary to increase the number of experiments with different sizes, different ratios and different additives.

Keywords- *Silt, Waste Chicken Feather, Standart Compaction Test, Unconfined Compression Test, Microstructure*

I. GİRİŞ

Zemin iyileştirmesi, geoteknik mühendisliğinde uzun zamandır uygulanan ve sürekli kullanılan malzeme ve yöntem olarak kendisini yenileyen bir konudur. Eski kaynaklara göre, Babil Tapınağının yapım sürecinde zemin iyileştirmesi yapıldığı ve eski dönemlerde Çinlilerin bambu veya saman çöpü gibi malzemeleri zemin iyileştirmede kullandıkları bilinmektedir [1]. Günümüzde ise tüketimin artması ve hammaddenin azalması sonucunda artan endüstriyel atıkların ekonomiye kazandırılması için bu atıkların geri kazanımının gerekliliği görülmektedir. Zemin iyileştirmesi, genel olarak zeminin birim hacim ağırlığının artırılması, yer altı su seviyesinin düşürülmesi, hidrolik iletkenlik katsayısının istenen düzeye getirilmesi, şişme/büzülme özelliğinin azaltılması ve zeminin dağınık yapısını çeşitli malzemelerin kullanılarak veya kullanılmayarak güçlendirilmesidir. Mevcut zemin özelliklerinin geoteknik mühendisliği açısından uygun olmadığı durumlarda, mekanik veya kimyasal zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi kullanılmaktadır. Kimyasal iyileştirmede, katkı maddeleri ile uygun olmayan zemin özelliklerinin uygun hale getirilmesi sağlanmaktadır. Kimyasal katkı maddesi olarak çimento, kireç, uçucu kül, atık cam, atık mermer tozu veya parçaları kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemlerinde atık malzemelerin kullanılmasıyla, doğal çevre kirliliğinin ve ekonomik kaybın azalması sağlanmakta ve doğadaki ham malzemelerin azalmasına engel olunmaktadır. Tavuk çiftliklerinde tüylerin çevreye atılması ve yakılmasının yasaklanmasından dolayı tavuk tüyünün değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Türkiye, 2015 yılında yaklaşık 2 milyon ton tavuk eti üretiminde bulunmuştur. Bu değer ile AB ülkelerindeki toplam üretimin %18'i karşılanmışsa da 200 bin ton tavuk tüyü atığına yol açılmıştır [2]. Bu durum, atıkların hem çevreye hem de insan sağlığına zarar vermeyecek, sürdürülebilir bir şekilde bertaraf edilmesinin daha çok önem kazandığı günümüzde, tavukçuluktan kaynaklanan yüksek miktarlardaki atığın ne şekilde bertaraf edileceği sorusunu da beraberinde getirmiştir [3].

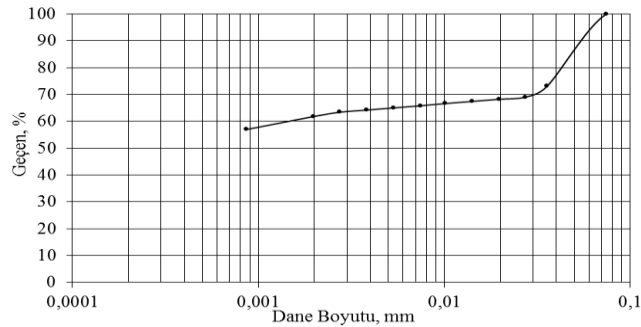
Endüstriyel bir atık olarak karşımıza çıkan bu doğal atık malzemesinin miktarının çok olmasından dolayı değerlendirmesi önem arz etmektedir. Atık tavuk tüyü, tavukçuluk üretiminde istenmeyen bir ürün veya malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. İşletmelerde üretim sonrası ortaya çıkan büyük miktarda atık tüyler ciddi katı atık sorununu meydana getirmektedir [4]. Atık tavuk tüyünün yeniden kullanımı ile ilgili az da olsa kristal yapısından dolayı farklı bilim dallarında çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan birisi olan, Ananda Rao vd. (2007) çalışmasında yazarlar tavuk tüyü katkılı epoksi kompozitlerde zayıf eğilme mukavemetini ve gerilme kuvvetini gözlemlemişler ve sonuç olarak aşınma performansının kısa tüy liflerinin takviyesi ile önemli gelişme gösterdiğini söylemişlerdir [5]. Uzun vd. (2011) ağırlıkça artan oranda tavuk tüyü ilavesinin vinil ester, polyester matrikslerin kullanıldığı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisini incelemiş ve lif ilavesinin artan miktarının mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini belirlemişlerdir [6]. Zhan ve Wool (2013) yılında epoksi ve tavuk tüyü lifiyle yaptıkları kompozit çalışmasında tavuk tüyü liflerinin yarı kristal yapısı nedeniyle farklı sıcaklıkta eksenel yönde negatif, radyal yönde pozitif bir ısıl genleşme değerine sahip olduğunu belirlemişlerdir [7]. Tavuk tüyünün içerdiği yüksek orandaki keratin, tüyün hidrofobik karakteri kompozit malzemede yoğunluk, termal, termomekanik özelliklere olumlu etki sağlamıştır [8-9]. Atık tavuk tüyü bazı çalışmalarda ise malzemelerin güçlendirmesinde kullanılmıştır [10-14]. Işık vd. (2015) çalışmasında yüksek plastisiteli kil zeminin iyileştirilmesinde, atık tavuk tüyünün kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında, atık tavuk tüyü, telek ve tüy lifi olarak %1.0 ve %2.0 oranlarında kullanılmıştır. Karışımlardan sonra hazırlanan numuneler 5 ve 10 donma-çözülme çevrim sayısına maruz bırakılmış ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Sonuçta, 4 mm telek kullanılmasının numunelerin serbest basınç mukavemetine olumlu bir etkisinin olmadığı ve 8 mm telek kullanılan numunelerde ise serbest basınç mukavemet değerinde önemli bir artış olmadığı gözlemlenirken, tüy lifli numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri artış göstermiştir [15]. Montes-Zarazúa vd (2015), %0.25, 0.50, 1.00 ve 3.00 oranlarında tavuk tüyünü kullanarak, zeminlerin şişme özelliklerindeki değişiklikler incelemişlerdir. Ödometrede deney sistemi kullanılarak şişme deneyleri yapılmış ve sonuçta tavuk tüylerinin şişen zeminlerde şişme basıncını azalttığını söylemişlerdir [16].

Bu çalışmada, tavuk tüyleri 3 farklı formda katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Böylelikle, tavuk tüyünün siltin geoteknik özelliklerine etkisi incelenmiş ve farklı oran ve boyutlardaki tavuk tüyünün zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

II. MALZEME

Kullanılan zemin malzemesi orta plastisiteli silt (MI) olup dane çapı dağılımı Şekil 1’de verilmiştir. Özel bir tavuk üretim firmasından alınan atık tavuk tüyleri, öncelikle yıkanmış ve havada kuruması sağlanmıştır. Atık tavuk tüyleri kurutulduktan sonra tam, yarım ve toz halinde olmak üzere üç farklı şekilde hazırlanmıştır (Şekil 2). Buna göre atık tavuk tüyleri bölgesel bir tavuk işletmesinden alındıktan sonra tüylerin stabil teknik bir malzemeye dönüştürülmesi amacıyla bazı ön işlemler uygulanmıştır; önce çeşme suyunda yıkanmış ve 135 °C’de 20 dakika sterilize edilmiş, sonra etüvde 60 °C’de 24 saat bekletilerek birinci kurutma, 105 °C’de 2 saat bekletilerek ikinci kurutma uygulanmıştır. Daha sonra tavuk tüyelerinin mekanik olarak küçük parçalara kesimleri yapılmıştır. Toz olarak kullanılacaklar laboratuvar değirmeninde öğütülmüş, boyutun 0.425 µm ve daha küçük olması sağlanmıştır.

Tavuk tüyü lifleri, içi boş ve sert yapıda protein lifidir. Bu lifler ısıtıldığında çapraz bağlar oluşur ve bu bağlar yapıyı sağlamlaştırmanın yanı sıra yapının daha gözenekli hale dönüşmesini sağlar. Tavuk tüyü diğer lifli malzemelerle benzer özelliklere sahiptir ve özellikle keratin yapıda olmasından dolayı yüne benzer. Selülozik liflerden 6-8 kat daha sağlamdır. Bazı özel uygulama alanlarında yün ve pamuk gibi doğal liflere kıyasla daha üstün özelliklere sahiptir. Liflerin ince olması temas yüzeyinin de daha geniş olmasını sağlar. Islak ortamda bozulmaya karşı dayanımı fazladır, suya doymuş halde bile hacmini koruma eğilimindedir. Kristal yapısından dolayı kararlı ve dayanıklıdır, bu özellikler kullanım alanlarının genişlemesine ve pahalı liflere daha ucuz alternatif oluşturmasını sağlar. Bu özelliklerinden dolayı farklı bilim dallarında çalışmalar yapılmaktadır. İnşaat kompozitlerine uygun olmasından dolayı da bu alanda çalışmalar yapılabilmektedir. Yalıtım ve kaplama amaçlı kullanılması (lambiri ve tavan gibi) kirli alanlara binen ağırlığı azaltarak yapının yük dayanımını artırabilir. Endüstri atık sularında yaygın olarak bulunan fenolü emmesiyle bu suların temizlenmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise toz atık tavuk tüyü geoteknik çalışmalarından birisi olan zemin iyileştirme amaçlı kullanılmıştır. Ayrıca, literatürle benzer olarak tavuk tüyelerinin yüksek protein içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Tavuk tüyü lifinin saç, tırnak ve hayvan boynuzlarında bulunan en yüksek miktardaki proteinin, çözünmeyen ve yüksek dayanıklılığa sahip olan keratinden oluştuğu görülmüştür. Keratin bir dizi amino asit içerir, bu amino asitler disülfid veya hidrojen bağları oluşturarak birbirleriyle çapraz bağlanma eğilimindedir. Bu da kompozit yapıya daha sert, güçlü, hafif olma özellikleri yanında iyi termal ve akustik yalıtım özellikleride kazandırabilmektedir [17-19].



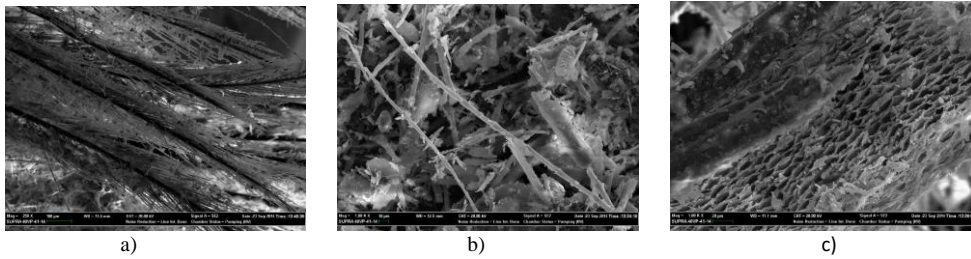
Şekil 1. Siltin dane çapı dağılımı



Şekil 2. a) Tam atık tavuk tüyü b) Kesilmiş atık tavuk tüyü c) Toz atık tavuk tüyü

III. YÖNTEM

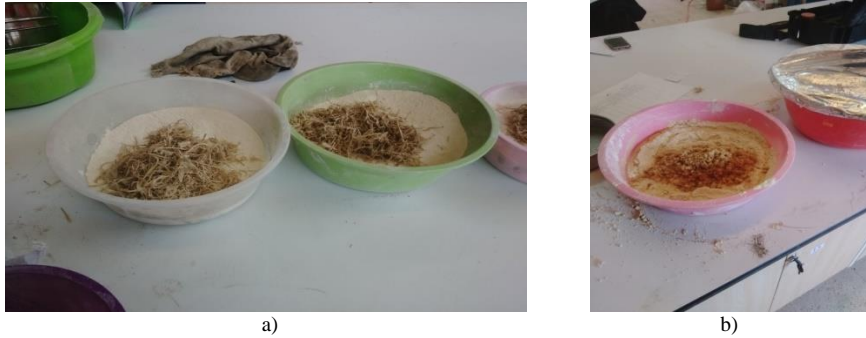
Öncelikle siltin likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Likit limit değeri 42 ve plastik limit değeri 33 olarak bulunmuştur. Tavuk tüylerinin genel kimyasal analizi AOAC (2002) standartlarına göre yapılmıştır [20]. % nem miktarı gravimetrik yöntemle $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde bekletilerek AOAC 945.21'e göre, % kül miktarı gravimetrik yöntemle 550°C 'de etüvde bekletilerek AOAC 923.03'e göre, protein miktarı Kjeldahl metoduyla AOAC 962.18'e göre belirlenen toplam azot miktarının 6,25 faktörüyle çarpılmasıyla, % yağ miktarı sokshlet metoduyla petrol eteri kullanılarak AOAC 920.39'e göre tayin edilmiştir. Tavuk tüyünün genel kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca tavuk tüyüne ait SEM görüntüsü Zeiss Supra 40VP ile elde edilmiştir (Şekil 3). Çalışma kapsamında, silte %1 ve %3 tam, kesilmiş ve toz atık tavuk tüyü eklenerek oluşturulan karışımlar Şekil 4.'de görülmektedir.



Şekil 3. a) Tavuk tüyünün mikroyapı görüntüsü b) Tüyün bulunduğu iskelet kısmı c) İskeletin peteksi iç dokusu

Tablo 1 Tavuk tüyü genel kimyasal bileşimi

	(%, Kuru bazda)
Ham Protein	77,00±0,78
Ham yağ	3,95±0,41
Kül	1,85±0,11
Nem	10,94±0,18

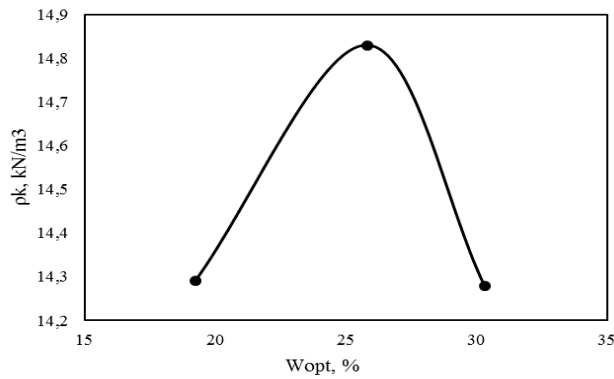


Şekil 4. a) Toz atık tavuk tüyü ve silt b) Kesilmemiş atık tavuk tüyü ve silt

Karışımlar hazırlandıktan sonra ASTM D698 (2012)'ye göre standart kompaksiyon deneyi yapılmıştır (Şekil 5) [21]. Şekil 6.'da siltin standart kompaksiyon deney sonucu elde edilen eğrisi verilmiştir. Tablo 2'de karışımların standart kompaksiyon deney sonucunda elde edilen optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlıkları görülmektedir. Atık tavuk tüy miktarının artmasıyla optimum su muhtevasının arttığı, maximum kuru birim hacim ağırlığının ise azaldığı görülmüştür. Fakat tüylerin küçülmesiyle optimum su muhtevalarının daha az arttığı görülmüştür. Optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenen karışımlar serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 7.' de numunelerin serbest basınç deneyine hazırlanması görülmektedir. Serbest basınç deneyi ASTM D2166 (2016)'ya göre yapılmıştır [22]. Serbest basınç deney sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Serbest basınç deneylerinde %3 kesilmiş atık tavuk tüyü ve %3 tam atık tavuk tüyü ile yapılan deneylerde birim boy kısalması %20'yi aştığı için deneyler sonlandırılmıştır. %1 kesilmiş atık tavuk tüyü katkılı numunenin dayanımı %2 artarken, diğer karışımların dayanımı azalmıştır. Şekil 9'da katkı yüzdelерinin serbest basınca etkisi görülmektedir.



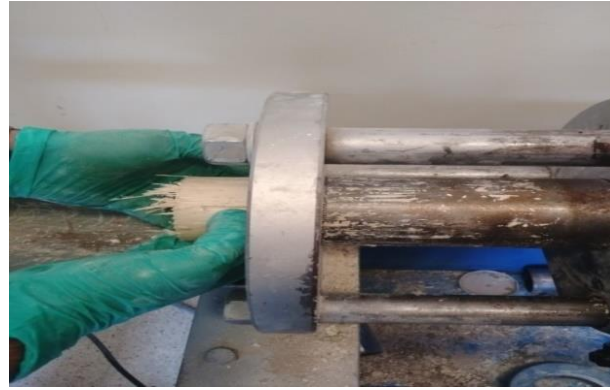
Şekil 5. Kompaksiyon sonrası atık tavuk tüyü ve silt karışımının kompaksiyon kalıbından çıkarılması



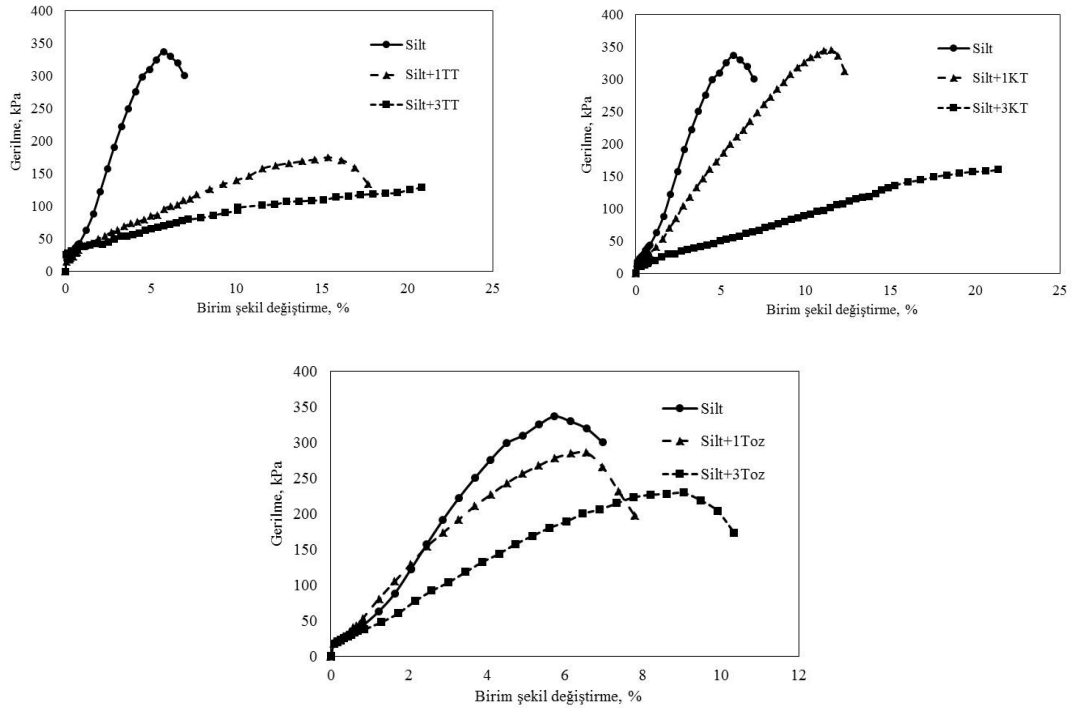
Şekil 6. Siltin standart kompaksiyon deney sonucu

Tablo 2. Standart kompaksiyon deneyi sonuçları

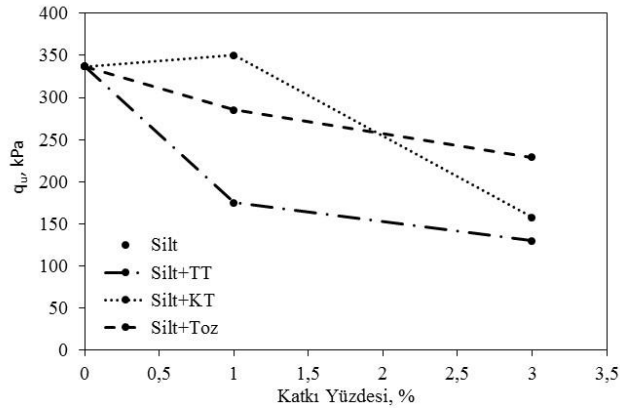
Numune	W_{opt} , %	ρ_{kmax} , kN/m^3
Silt	25	14.82
Silt + %1 Tam Tüy	30	14.15
Silt + %3 Tam Tüy	34	12.80
Silt + %1 Kesilmiş Tüy	28	14.17
Silt + %3 Kesilmiş Tüy	32	13.62
Silt + %1 Toz Tüy	25	14.52
Silt + %3 Toz Tüy	28	13.75



Şekil 7. Numunenin çıkarılması



Şekil 8. Karışımların serbest basınç dayanım eğrileri



Şekil 9. Katkı yüzdelere serbest basınç dayanımına etkisi

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, atık tavuk tüyü silte toz, kesilmiş ve tam olmak üzere %1 ve %3 oranlarında eklenerek, zeminlerin serbest basınç dayanımında doğal lif olarak kullanılan atık tavuk tüylerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle standart kompaksiyon deneyleri yapılmış ve atık tavuk tüy miktarının artmasıyla optimum su muhtevasının arttığı, atık tavuk tüylerinin boyutlarının küçülmesiyle optimum su muhtevalarının daha az arttığı görülmüştür. Standart kompaksiyon deneyi ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçlarından, %1 kesilmiş atık tavuk tüyü katkılı numunenin dışındaki tüm karışımlarda serbest basınç dayanımının azaldığı ve daha farklı yüzdelerde, boyutlarda ve biçimlerde deney sayısının artırılmasının gerekliliği görülmüştür. Sonuç olarak, atık tavuk tüyünün pahalı liflere alternatif potansiyel malzeme olabileceği görülmüş fakat atık tavuk tüyünün zemin iyileştirmede kullanılabilirliğinin daha net belirlenebilmesi için daha farklı boyutta, farklı oranlarda ve farklı katkı malzemeleriyle deney sayısının artırılmasının gerekliliği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Van Impe, W. E., "Soil improvement techniques and their evaluation", *Balkema*, Rotterdam, Netherlands, 1989.
- [2] Türkiye İstatistik Kurumu website, Haber Bülteni - Kümes Hayvancılığı Üretimi, [Online]. Available: http://www.tuik.gov.tr/basinOdasi/haberler/2016_40_20160330.pdf, 2016.
- [3] Sarı Ö.F., Özdemir, S., Tavuk Kesimhane Atıklarının Yönetimi ve Alternatif Değerlendirme Yöntemleri, Sakarya Ticaret Borsası website, [Online]. Available: <https://www.stb.org.tr/Dosyalar/Arastirmalar/tavuk-kesimhane-atiklarinin-yonetimi.pdf>, 2018.
- [4] Bartels, T., "Variations in the morphology, distribution, and arrangement of feathers in domesticated birds", *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, vol. 298(1), pp. 91-108, 2003.
- [5] Rao, A., V., Satapathy, A. ve Mishra, S. C., "Polymer Composites Reinforced with Short Fibers Obtained from Poultry Feathers", *Proceedings of International and INCCOM-6 Conference Future Trends in Composite Materials and Processing*, Indian Institute of Technology, Kanpur, 2007.
- [6] Uzun, M., Sancak, E., Patel, I., Usta, I., Akalin, M. ve Yuksek, M., "Mechanical Behaviour of Chicken Quills and Chicken Feather Fibres Reinforced Polymeric Composites", *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 52(2): pp. 82-86, 2011.

- [7] Zhan M. ve Wool R.P., “Thermal Expansivity of Chicken Feather Fiber Reinforced Epoxy Composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 128(2), pp. 997-1003, 2013.
- [8] Flores-Hernández, C. G, Colín-Cruz, A., Velasco-Santos, C., Castaño, V. M., Rivera-Armenta J. L., Almendarez-Camarillo, A., García-Casillas, P. E. ve Martínez-Hernández, A. L., “All green composites from fully renewable biopolymers: Chitosan-starch reinforced with keratin from feathers” , *Polymers*, vol. 6(3), pp. 686-705, 2014.
- [9] Jimenez-Cervantes Amieva, E., Velasco-Santos, C., Martinez-Hernandez, A. L., Rivera-Armenta, J. L., Mendoza-Martinez, A. M. ve Castano, V. M., “Composites from Chicken Feathers Quill and Recycled Polypropylene”, *Journal of Composite Materials*, vol. 49(3), pp. 275–283, 2014.
- [10] Dweib, M. A., Bullions, T. A., Loss, A. C. ve Wool, R. P., “Recycled Newspaper and Chicken Feathers as Reinforcement Fiber in Bio-Composite Materials”, *Proc. Annual Technical Conference - ANTEC*, pp. 1478-1482, 2004.
- [11] Acda, M. N., “Waste chicken feather as reinforcement in cement-bonded composites”, *Philippine Journal of Science*, vol. 139(2), pp. 161-166, 2010.
- [12] Uzun, M., Sancak, E., Patel, I., Usta, I., Akalın, M. ve Yuksek, M., “Mechanical behaviour of chicken quills and chicken feather fibres reinforced polymeric composites”, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 52(2), pp. 82-86, 2011.
- [13] Subramani, T., Krishnan, S., Ganesan, S. K. ve Nagarajan, G., “Investigation of mechanical properties in polyester and phenylester composites reinforced with chicken feather fiber”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 1(4), 93-104, 2014.
- [14] Amieva, E. J-C., Velasco-Santos, C., Martinez-Hernandez, A. L., Rivera-Armenta, J. L., Mendoza-Martinez, A. M. ve Castan, V. M., “Composites from chicken feathers quill and recycled polypropylene”, *Journal of Composite Materials*, vol. 49(3), pp. 275–283, 2015.
- [15] Işık, F., Akbulut R. K., Zaimoğlu, A. Ş. ve Arasan, S., “Kil Zeminlerin İyileştirmesinde Atık Doğal Liflerin Kullanabilirliği”, *6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana*, 2015.
- [16] Montes-Zarazua E., Colin-Cruz A., Perez-Rea M. D., de Icaza M., Velasco-Santos C., Martinez-Hernandez A. L., “Effect of Keratin Structures from Chicken Feathers on Expansive Soil Remediation”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, Article ID 907567, 10 pages, 2015.
- [17] Schmidt, W. F., “Innovative feather utilization strategies”, *Proc. National Poultry Waste Management Symposium*, Auburn University Printing Services, pp. 276-282, 1998.
- [18] Acda, M. N. “Waste Chicken Feather as Reinforcement in Cement-Bonded Composites”, *Philippine Journal of Science*, vol. 139, pp. 161-166, 2010.
- [19] Tseng, F.C.J, Verbeek, C.J.R. “Biofibre production from chicken feather”, *Proc. SCENZI Chemical Annual Conference 2011*, New Zealand, 2011.
- [20] AOAC, “Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists”, 17th Ed., Editor; William Horwitz, 2002.
- [21] ASTM D 698, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort”, *Annual book of ASTM Standards*, vol. 15.09, West Conshohocken PA, 2012.



- [22] ASTM D 2166, “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, *Annual book of ASTM Standards*, vol. 4.08, West Conshohocken PA, 2016.

Düzeltilme - Erratum

Bir Konut İçin Isıtma Konseptinin Termodinamik Analizi

Adem Avşar^{1*}, Oğuz Arslan²

Geliş / Received: 19/03/2020

Kabul / Accepted: 06/04/2020

DÜZELTME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisinin 2020 yılı, 7. Cilt, 1. Sayısında yayınlanan “*Bir Konut İçin Isıtma Konseptinin Termodinamik Analizi*” başlıklı makalede yapılan düzeltme ve açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

82. Sayfada Giriş bölümünün ilk paragrafında yer alan “Makale değerlendirme ve kabul süreci hakkında ayrıntılı bilgiye dergi web sitesi üzerinden ulaşılabilir.” şeklinde dergi şablonunda mevcut olan metnin makale üzerinde kaldığı fark edilmiş ve ilgili ifadenin silinmesi uygun görülmüştür.
- Makaledeki Şekil numaraların birbirini takip edecek şekilde güncellenmesi uygun görülmüştür.
87. Sayfada birinci paragraftan sonra “Farklı yakıt türleri kullanılması durumunda gerçekleşen ekserji kayıpları Şekil 6-7’de verilmektedir.” ifadesinin eklenmesi yazarlar tarafından uygun görülmüştür.

Düzeltilme - Erratum

Bir Konut İçin Isıtma Konseptinin Termodinamik Analizi

Adem Avşar^{1*}, Oğuz Arslan²

Geliş / Received: 19/03/2020

Kabul / Accepted: 06/04/2020

ÖZ

Bu çalışmada, örnek bir konut için ısıtma davranışı enerjistik ve ekserjistik açılarından değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, TS 825 (Binalarda ısı yalıtım kuralları) açısından bir örnek konut için ısı kayıpları ve kazanımları hesaplanmıştır. Bu bağlamda, ele alınan kontrol hacmi (örnek konut) için farklı parametreler dikkate alınarak enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre, en çok ısı gereksinimi ocak ayında iç ortam sıcaklığının 24°C kabul edilmesi durumunda 5500 kWh olarak, ekserji verimi ise %3 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Enerji, Ekserji, Isı kaybı, Konut

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ademavsr@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-8465-4081>)

Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

²İletişim: oguz.arslan@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8233-831X>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye

Thermodynamic Analysis of the Heating Concept for a Residence

ABSTRACT

In this study, the thermal performance of a residence was evaluated in terms of energy and exergy. In this context, heat losses and gains were calculated for a sample residence taking the rules of TS 825 (thermal insulation rules in buildings) into account. Energy and exergy analysis were conducted for different parameters on the control volume (sample residence). In this regard, the maximum heat requirement during the heating period was calculated as approximately 5500 kWh in January for indoor temperature of 24°C and the highest exergy efficiency was calculated as 3%.

Keywords- *Energy, Exergy, Heat loss, Residence*

I. GİRİŞ

Binalar yüksek oranda bir enerji kullanıcılarıdır. Binalarda hem mahallerin ısıtılması için hem de sıcak su elde etmek için enerjiye ihtiyaç vardır. Binaların enerji ihtiyacını, yalıtımı artırarak veya bina kabuğunun hava sızıntısını azaltarak düşürmeye çalışılır. Binanın konumunu en iyi şekilde kullanmak ısıtım ile kazanımları arttırmak, enerji gereksinimini azaltacaktır. Buna bağlı olarak şehirlerin veya yapıların planlamaları yapılırken enerji kazançları ve kayıplarının değerlendirilmesi, binalarda kullanılacak enerji tüketiminin düşmesine sebep olacaktır.

Ekserji analizi yöntemi kullanılarak; bina ısıtma sistemlerinde daha yüksek verimler, fiyat, kaynak kullanımı, çevresel etki ve sürdürülebilirlik için yapılması gereken iyileştirmeler mümkün kılınabilir.

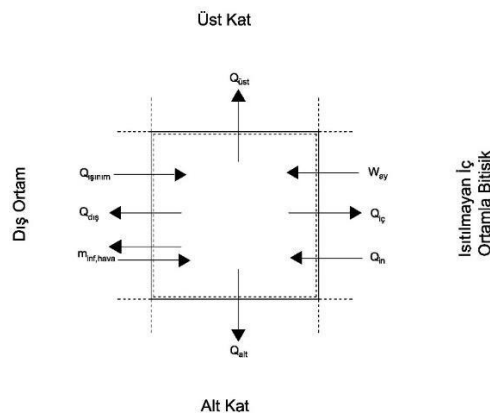
Düşük ekserji ihtiyaçları için uygun enerji kaynaklarının kullanımı konusundaki sistem tasarımlarına ek olarak, ekserji kayıplarını en aza indireyecek şekilde bina sistemi kontrol stratejilerinin belirlenmesi gereklidir. İyi bir yalıtım, bina kabuğundaki hava sızıntılarının önlenmesi, gün ışığından faydalanılması ve güneş enerjisinin pasif kullanımı önemli faktörlerdir.

Binaların ısıtma sistemlerinin geleneksel enerji analiziyle beraber ekserji analizinde kullanılarak incelenmesi konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Schmidt [1] yaptığı çalışmada, ısı kayıplarını elde etmek için enerji ve ekserji analizlerine dayanan hesaplamalar yapmıştır. Birden çok ailenin yaşadığı bir binada, bina kabuğu için iyileştirmeler sağlamıştır. Duvar ve pencerelerin ısı geçirgenlik katsayılarını değiştirerek odanın ekserji yükünü daha uygun bir değere indirmiştir. Shukuya [2] ise binaların daha iyi bir şekilde değerlendirilebilmesi için ekserji yaklaşımını anlatmıştır. Geleceğin binalarında ısıtma ve soğutma için düşük ekserjili sistemlerin uygun olacağını ifade etmiştir. Balta [3], bir düşük ekserjili ısıtma sisteminin enerji, ekserji, ekserji maliyet analizleri ile sürdürülebilirlik değerlendirmesini yapmıştır. 2366 m² alana sahip kapalı bir spor salonunun ele alındığı örnek çalışma ile kazan, yoğunlaşma kazan ve hava kaynaklı ısı pompası kullanan üç farklı ısıtma sistemini araştırmıştır. Han ve arkadaşları [4], ekserji analizini bir binanın ısı yükü ve ilgili enerji akımlarını inceleyerek bina tasarımının iyileştirilme potansiyeli ve ekserji kayıplarının belirlenmesi üzerinde çalışmışlardır. Çin’de farklı iklim bölgelerinde yer alan beş farklı bina incelenmiştir.

Bu çalışmada, konutu temsil etmek üzere ele alınan bir kontrol hacmi (KH) ele alınmış ve bina ısıtma prosesi kapsamında enerji ve ekserji analizi metodlarıyla termodinamik açıdan değerlendirilmiştir.

II. MATERYAL ve METOD

Bina ısıtma prosenin termodinamik açıdan değerlendirilebilmesi için ele alınan KH Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Isıtma prosesi Kontrol Hacmi.

Şekil 1’de verilen KH hacmi taban alanı 330 m², pencere alanı 22.76m²,vehacmi 414 m³olan bir konutu temsil etmektedir. Ele alınan KH’de, üst ve alt katta ısıtma yapıp yapılmamasına bağlı olarak gerçekleşen ısı kayıpları; dış duvar kabuğundan, tavan, taban ve ısıtılmayan iç ortamla bitişik duvar kabuğundan gerçekleşmektedir. Buna göre farklı iç ortam sıcaklıkları (T_i), faklı ısıtılmayan iç ortam sıcaklıkları (T_{i,iç}) alt ve üst katta ısıtma yapıp yapılmaması durumları için parametreler oluşturulmuş ve bu parametreler ışığında farklı ısıtma sistemleri ve farklı yakıt kullanım durumları ele alınmıştır. Oluşturulan parametrelere bağlı örnek çalışma koşulları Tablo1’de verilmektedir.

Tablo 1. Yapı bileşenleri detayları.

Yapı bileşeni	Isı iletim katsayısı,(W/m K)
Dış duvar (Dış havaya açık)	0.395
Kolon Kiriş (Dış havaya açık)	0.499
İç duvar (ısıtılmayan ortama bitişik,20cm)	0.52
Dış pencere	1.3
Dış kapı	3.5
Ara kat Döşemesi(rabita)	0.561
Çatı	0.369
Açık Geçit Taban(rabita)	0.568
Açık Geçit Taban (toprak temaslı)	0.332

Şekil 1’de verilen KH’ne göre kütleli korunumu ifadesi;

$$\sum m_g = \sum m_{\zeta} \quad (1)$$

şeklindedir. Ele alınan KH için enerji dengesi ise;

$$\sum E_g - \sum E_{\zeta} = \Delta E_{sis} \quad (2)$$

şeklinde verilir. Bir ısıtma sezonu için bu ifade;

$$\sum E_g - \sum E_{\zeta} = 0 \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir; Şekil 1’de verilen bileşenler doğrultusunda enerji denklemi;

$$Q_{gerekli} = (Q_{ışınım} + Q_{cihaz} + Q_{insan} + Q_{inf,g}) - (Q_{duvar} + Q_{üst} + Q_{alt} + Q_{iç} + Q_{inf,\zeta}) \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada Q_{alt} ; tabandan kaybolan ısı, $Q_{üst}$; tavadan kaybolan ısı, $Q_{iç}$; ısıtılmayan iç ortamla bitişik duvardan kaybolan ısı, Q_{duvar} ; dış ortama bakan duvar kabuğundan kaybolan ısı, $Q_{inf,g}$; dış ortamdan iç ortama sızan havadan kaynaklanan ısı, $Q_{inf,\zeta}$; iç ortamdan dış ortama sızan havadan kaynaklanan ısı $Q_{ışınım}$; güneş ışınlarından kazanılan ısı, Q_{cihaz} ; cihazların enerji transferi ile kazanılan ısı, Q_{insan} ; insanların metabolik faaliyetlerinden kazanılan ısı enerjisi tanımlanmış olup aşağıdaki verildiği gibi tanımlanmıştır [5].

$$Q_{duvar} = A_{duvar} \cdot U_{duvar} \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$Q_{üst} = A_{tavan} \cdot U_{tavan} \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$Q_{alt} = A_{taban} \cdot U_{taban} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$Q_{iç} = A_{iç,duvar} \cdot U_{iç,duvar} \cdot \Delta t \quad (8)$$

$$Q_{ışınım} = \sum r_{i,ay} \cdot g_{i,ay} \cdot I_{i,ay} \cdot A_i \quad (9)$$

$$Q_{inf,g} = 0,33 \cdot n_h \cdot V_h \cdot T_i \quad (10)$$

$$Q_{inf,\zeta} = 0,33 \cdot n_h \cdot V_h \cdot T_d \quad (11)$$

$$Q_{insan} = W_{insan} \quad (12)$$

$$Q_{aydınlatma} = W_{aydınlatma} \quad (13)$$

Buna göre gerekli yakıt miktarı;

$$m_{yakıt} = \frac{Q_{gerekli}}{\eta_{yakmasistemi} \cdot H_u} \quad (14)$$

ifadesi ile bulunur.

Ele alınan KH için ekserji dengesi ise;

$$Ex_g - Ex_{\zeta} - Ex_d = \Delta E_X \quad (15)$$

şeklinde verilir. Bir ısıtma periyodu için;

$$Ex_d = Ex_g - Ex_{\zeta} \quad (16)$$

şeklinde tekrar yazılabilir. Şekil 1’de verilen bileşenler doğrultusunda;

$$Ex_d = (Ex_{ışınım} + Ex_{cihaz}^w + Ex_{insan}^Q + Ex_{inf,g} + Ex_{yakıt}^X) - (Ex_{duvar}^Q + Ex_{üst}^Q + Ex_{alt}^Q + Ex_{iç}^Q + Ex_{inf,\zeta}) \quad (17)$$

eşitliği elde edilir. Burada;

$$Ex_{duvar}^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q_{duvar} \quad (18)$$

$$Ex_{alt}^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q_{alt} \quad (19)$$

$$Ex_{üst}^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q_{üst} \quad (20)$$

$$Ex_{iç}^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q_{iç} \quad (21)$$

$$Ex_{ışınım} = \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^4 - \frac{4}{3} \cdot \frac{T_0}{T}\right) \cdot I_{ışınım} \quad (22)$$

$$Ex_{inf} = m_{inf} \cdot [c_p \cdot (T - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0})] \quad (23)$$

$$Ex_{cihaz}^w = W_{cihaz} \quad (24)$$

$$Ex_{insan}^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q_{insan} \quad (25)$$

olup, ekserji verimi;

$$\varepsilon = 1 - \frac{Ex_d}{Ex_g} \quad (26)$$

şeklinde verilir.

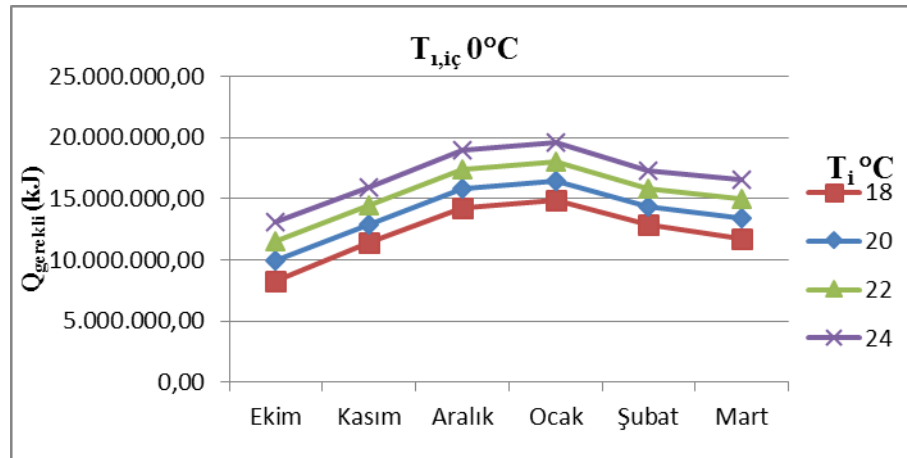
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Enerji ve ekserji analizi için gerekli parametreler Tablo 2’de verildiği şekliyle hesaplara dâhil edilmiştir.

Tablo 2. Hesap parametreleri [5,6]

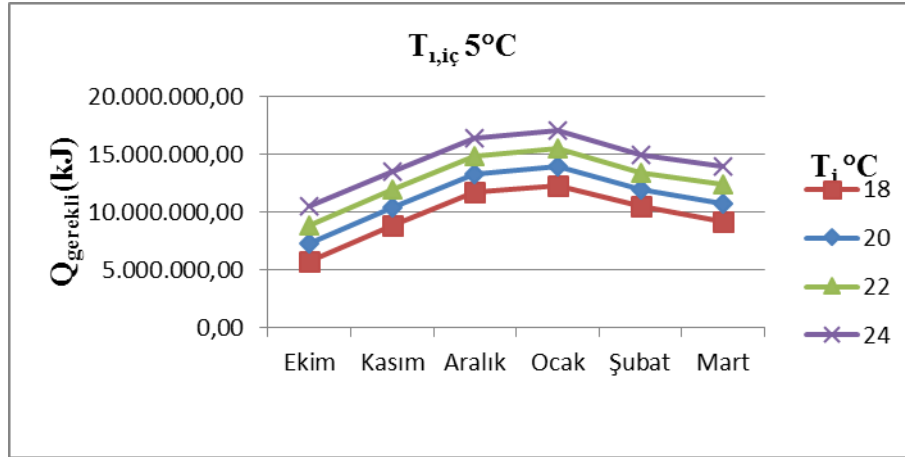
Semboller	Açıklama	Değerler
τ_{ay}	Saydam yüzeylerin aylık ortalama gölgenleme faktörü	0.6
g_i	Laboratuar şartlarında ölçülen ve yüzeyde dik gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörü	0.75
T_i (°C)	İç ortam sıcaklığı için parametreler	18-24
$T_{\text{iç}}$	Isıtılmayan iç ortam sıcaklığı için parametreler	0-15
$T_d - Q_{\text{ışınım}}$	Ekim	14.1°C-700.03 W
	Kasım	8.5°C-495.72 W
	Aralık	3.8°C-435.22 W
	Ocak	2.9°C-505.39 W
	Şubat	4.4°C-671.38 W
	Mart	7.3°C-881.83 W
$\eta_{\text{yak.sis.,doğalgaz}}$	Doğalgaz kazanı, yakma sisteminin verimi	0.885
$\eta_{\text{yak.sis,kömür}}$	Kömür kazanı, yakma sisteminin verimi	0.772
$\eta_{\text{kömür,kazan}}$	Kazan verimi	0.772
$\eta_{\text{dogalgaz,kazan}}$	Kazan verimi	0.885
$W_{\text{aydınlama}}$	Cihazlardan gelen enerji KH için	102W
W_{insan}	İnsanlardan gelen enerji KH için	464W
n_h	Doğal havalandırma kat sayısı (TS825)	0.8
V_h	KH'nin hacmi	414 m ³

Enerji analizi sonuçlarına göre; gerekli ısı enerjisi değerlerinin değişimi, ısıtılmayan iç ortam, KH sıcaklık parametreleri ve aylara bağlı olarak Şekil 2-5’te verilmektedir.



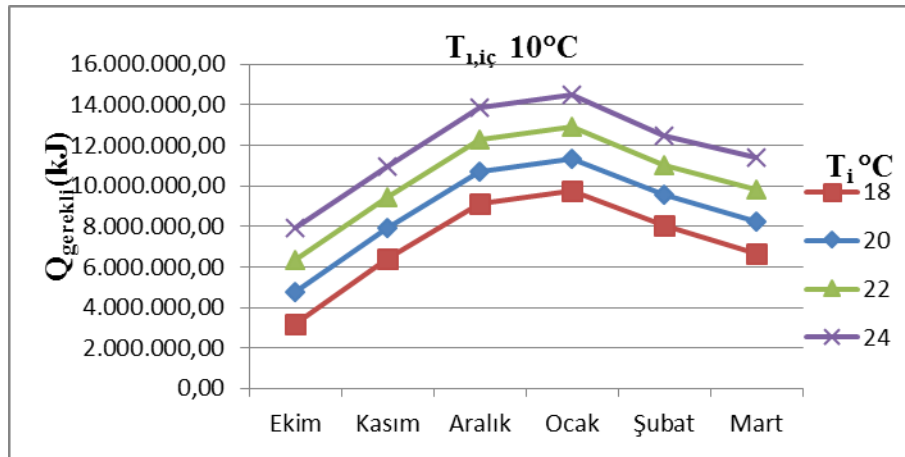
Şekil 2. Isıtılmayan ortam sıcaklığının 0°C durumunda ısı gereksinimlerinin değişimi.

Şekil 2 incelendiğinde, ısıtma ihtiyacı için gerekli ısı enerjisi değerleri 8311160.46 kJ -19633091.10 kJ arasında değişmektedir. İç ortam tasarım sıcaklığı arttığında beklenildiği gibi ısı gereksinimleri de artmaktadır. En yüksek ısı gereksinimi iç ortam sıcaklığının 24 °C olması durumunda Aralık-Ocak aylarında belirlenmiştir.



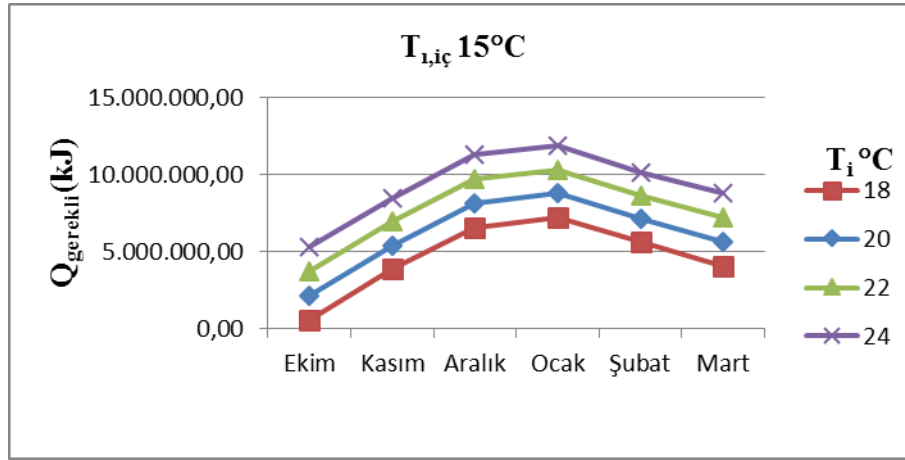
Şekil 3. Isıtılmayan ortam sıcaklığının 5°C durumunda ısı gereksinimlerinin değişimi.

Şekil 3 incelendiğinde, ısıtma ihtiyacı için gerekli ısı enerjisi değerleri 5739323.07 kJ – 17061253.71 kJ arasında değişmektedir. İç ortam tasarım sıcaklığı arttığında beklenildiği gibi ısı gereksinimleri de artmaktadır. En yüksek ısı gereksinimi iç ortam sıcaklığının 24 °C olması durumunda Aralık-Ocak aylarında belirlenmiştir.



Şekil 4. Isıtılmayan ortam sıcaklığının 10°C durumunda ısı gereksinimlerinin değişimi.

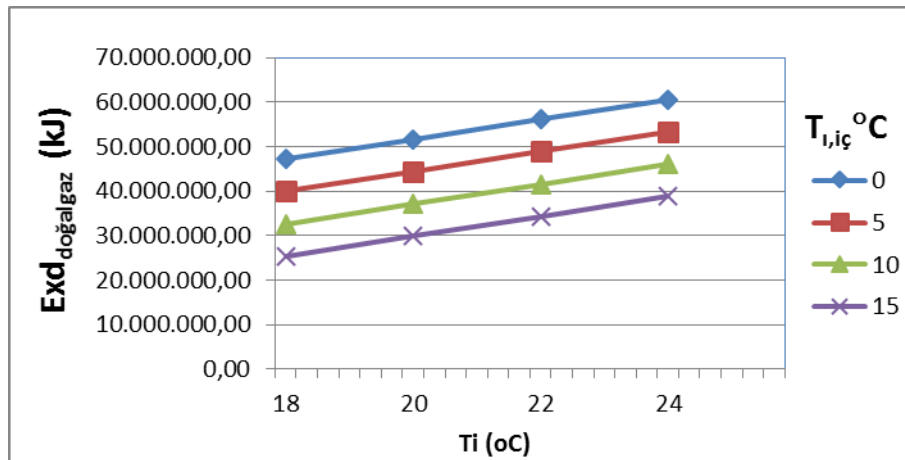
Şekil 4 incelendiğinde, ısıtma ihtiyacı için gerekli ısı enerjisi değerleri 3167485.68 kJ -14489416.31 kJ arasında değişmektedir. İç ortam tasarım sıcaklığı arttığında beklenildiği gibi ısı gereksinimleri de artmaktadır. En yüksek ısı gereksinimi iç ortam sıcaklığının 24 °C olması durumunda Aralık-Ocak aylarında belirlenmiştir.



Şekil 5. Isıtılmayan ortam sıcaklığının 15°C durumunda ısı gereksinimlerinin değişimi.

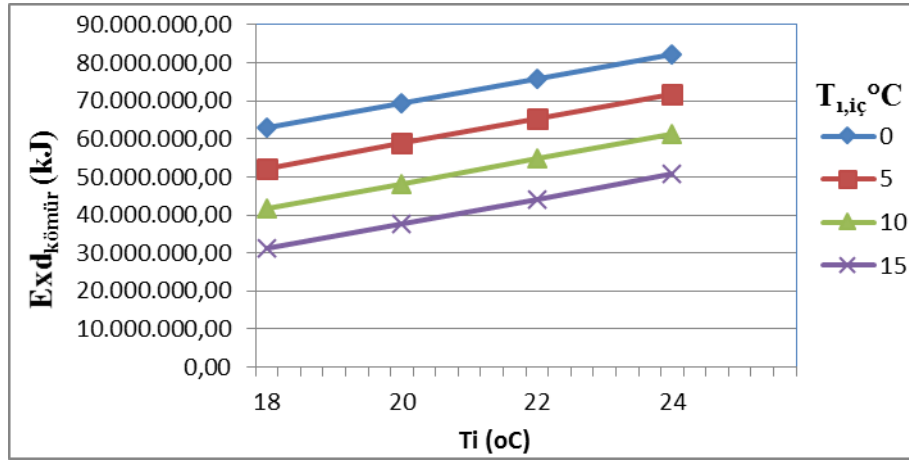
Şekil 5 incelendiğinde, ısıtma ihtiyacı için gerekli ısı enerjisi değerleri 595648.29 kJ -11917578.92 kJ arasında değişmektedir. İç ortam tasarım sıcaklığı arttığında beklenildiği gibi ısı gereksinimleri de artmaktadır. En yüksek ısı gereksinimi iç ortam sıcaklığının 24 °C olması durumunda Aralık-Ocak aylarında belirlenmiştir.

Farklı yakıt türleri kullanılması durumunda gerçekleşen ekserji kayıpları Şekil 6-7’de verilmektedir.



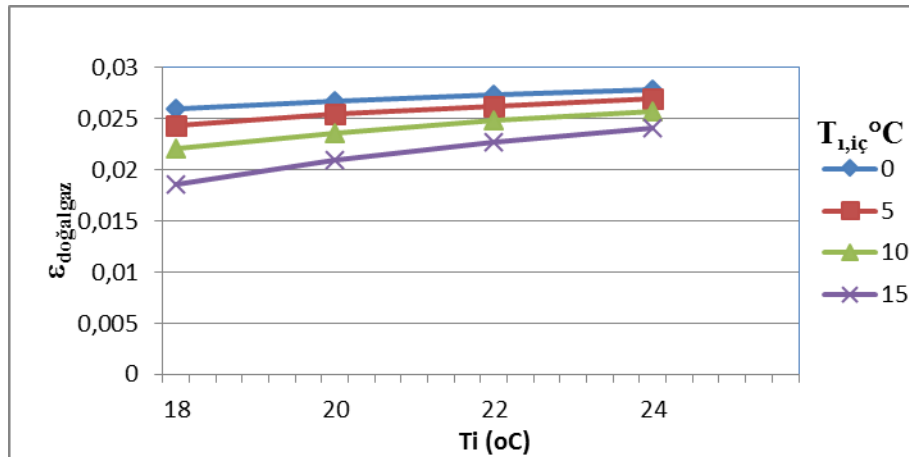
Şekil 6. Doğalgaz kullanılması durumunda ekserji kayıpları

Şekil 6 incelendiğinde, yakıt olarak doğalgaz kullanılması durumu için KH sıcaklık parametrelerine (T_i °C) bağlı olarak, ısıtılmayan iç ortam sıcaklık değeri düştüğünde yıkımın daha fazla gerçekleştiği görülmüştür.



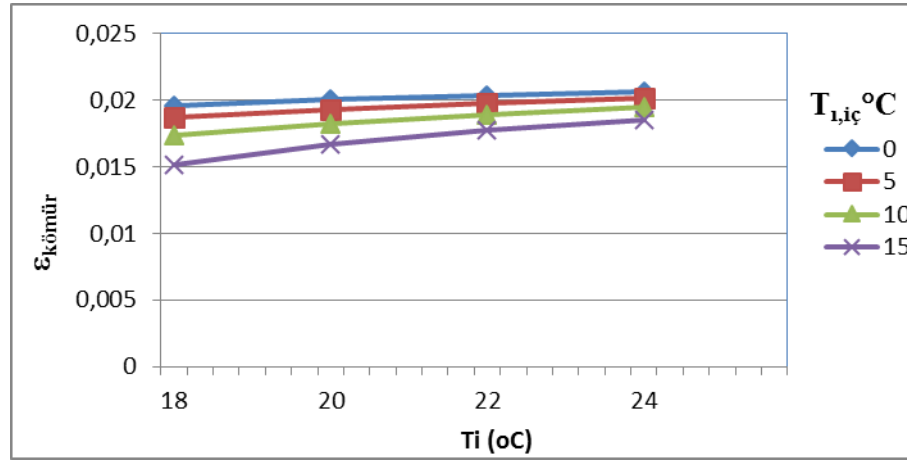
Şekil 7. Kömür kullanılması durumunda ekserji kayıpları

Şekil 7 incelendiğinde, yakıt olarak kömür kullanılması durumu için KH sıcaklık parametrelerine (T_i °C) bağlı olarak, ısıtılmayan iç ortam sıcaklık değeri düştüğünde yıkımın daha fazla gerçekleştiği görülmüştür. Ekserji verim değişimleri Şekil 8-9'da verildiği gibidir.



Şekil 8. Doğalgaz kullanılması durumunda ekserji verimliliği

Şekil 8 Doğal gaz yakıt olarak kullanılması durumunda HK sıcaklık parametrelerine bağlı olarak, $T_{1,iç}$ 0 ° C ve T_i 24 ° C durumunda en yüksek verim 0.028 olarak hesaplanırken, en düşük verim ise sıcaklık parametreleri $T_{1,iç}$ 15 ° C ve T_i 18 ° C durumunda 0.019 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre ise ekserji verimliliği oldukça düşük bulunmuştur.



Şekil 9. Kömür kullanılması durumunda ekserji verimliliği

Şekil 9 kömür yakıt olarak kullanılması durumunda KH sıcaklık parametrelerine bağlı olarak, $T_{1,iç}$ 0 ° C ve T_i 24 ° C durumunda en yüksek verim 0.021 olarak hesaplanırken, en düşük verim ise sıcaklık parametreleri $T_{1,iç}$ 15 ° C ve T_i 18 ° C durumunda 0.015 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre ise ekserji verimliliği oldukça düşük bulunmuştur.

IV. SONUÇLAR

Yakıt olarak doğalgaz kullanılması durumunda ekserji yıkımı değerleri azalmaktadır. Sistemin farklı yakıtlar kullanılması durumunda ekserji verimi aynı koşullar baz alındığında, KH'nin 24°C olması ve ısıtılmayan ortam sıcaklığının 0°C olması durumunda Exddoğalgaz'ın en yüksek değeri 60570451.46(kJ) ile Exdkömür'ün en yüksek değeri 82174366.91(kJ) için kıyaslandığında, yaklaşık olarak %26'lık ekserji yıkımında düşüş meydana gelmiştir.

KH'nin 18°C olması ve ısıtılmayan ortam sıcaklığının 15°C olması durumunda Exddoğalgaz'ın en düşük değeri 25376917.93(kJ) ile Exdkömür'ün en düşük değeri 31324454.91(kJ) için kıyaslandığında, yaklaşık olarak %19'luk ekserji yıkımında düşüş meydana gelmiştir.

Buna bağlı olarak ısı gereksinimi arttığında doğalgaz kullanımı ekserji verimliliği açısından daha verimlidir. Ekserji verimliliği, yakıt olarak doğalgaz kullanılması durumunda ve tüm parametreler göz önüne alındığında 0.018598869-0.027845905 arasında ve yakıt olarak kömür kullanılması durumunda ve tüm parametreler göz önüne alındığında 0.015120921-0.020676492 arasında çıkmıştır. Bu parametrelerde; KH'nin 24°C olması ve ısıtılmayan ortamın 0°C olması durumunda verimliliğin en yüksek değere, KH'nin 18°C olması ve ısıtılmayan ortamın 15°C olması durumunda verimliliğin en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Buna rağmen ekserji verimleri oldukça düşüktür. Bunu sebebi atık ısılardan fayda sağlanamaması, enerjinin ısı enerji olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ekserji artırımı yapmak için yanma sonun atıklarının değerlendirilmesi düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Schmidt, D. (2004). Design of low exergy buildings-method and a pre-design tool. *The International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 3(2004), 1-47.
- [2] Shukuya, M. (2009). Exergy concept and its application to the built environment. *Building and Environment*, 44(7), 1545-1550.
- [3] Balta, M. T., Kalinci, Y., & Hepbasli, A. (2008). Evaluating a low exergy heating system from the power plant through the heat pump to the building envelope. *Energy and Buildings*, 40(10), 1799-1804.

- [4] Han, T., Zheng, Y., & Gong, G. (2017). Exergy analysis of building thermal load and related energy flows in buildings. *Indoor and Built Environment*, 26(9), 1257-1273.
- [5] TSE (Türk Standartları Enstitüsü), 2013. TS 825:Binalarda Isı Yalıtım Kuralları.
- [6] Arslan, O., Ozgur, M. A., Yildizay, H. D., & Kose, R. (2009). Fuel effects on optimum insulation thickness: an exergetic approach. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(2), 128-147.
- [7] Hepbasli, A. (2008). A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(3), 593-661.
- [8] Yücer, C. T. (2016). Ekserji Analizi Yöntemi Kullanılarak Bina Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 57(681), 59-64.
- [9] Termodinamik.info. *Doğalgaz Yakıtlı Kazanlar*. <https://www.termodinamik.info/dogal-gaz-yakitli-kazanlar>